Postverlagsort Düsseldorf

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

BEGRÜNDET VON A. BERLINER UND C. THESING

UNTER MITWIRKUNG VON

J. BARTELS E. BEDERKE H. BROCKMANN P. TEN BRUGGENCATE C. W. CORRENS H. v. FICKER R. GRAMMEL O. HAHN R. HARDER M. HARTMANN W. HEISENBERG A. KÜHN M. v. LAUE H. MARTIUS R. W. POHL H. REIN E. SCHMIDT

HERAUSGEGEBEN VON

ARNOLD EUCKEN

ORGAN DER MAX PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTEN

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

35. JAHRGANG HEFT 8 (225—256) 1948

INHALT:

Zur Problematik der Alchemie und ihrer Ausstrahlungen auf die modernen Naturwissenschaften. Von P. Walden 225

Das Windfeld über den Meereswellen. Von U. Roll 230

Hundert Jahre „Homoiothermie". Von J. Aschoff 235

Einfache Grundvorgänge in der tierischen Entwicklung II. 2. Fortsetzung. Von K. Henke 239

Über Isosterie. Von J. Goubeau 246

Berichte.

Ostafrikas Primatenfunde. Von W. O. Dietrich 251

Über die Farbenanpassung der Koppe (Cottus gobio L.). Von V. Vršanský 252

Kurze Originalmitteilungen.

Über das Temperaturfeld im freibrennenden Niederstromkohlebogen. Von H. Maecker und J. Sperling 253

Zur systematischen Bestimmung der Phasen von Röntgenstreuwellen bei der Kristallstrukturanalyse. Von W. Hoppe. 254

Die Synthese der 1, 3, 4-Trimethyl-6äthyl-Δ^3-tetrahydrobenzoesäure. Von E. Buchta. 255

Mißbildungen an Tritonkeimen durch experimentellen Sauerstoffmangel nach abgeschlossener Gastrulation. Von H. Rübsaamen 255

Über die Magnesiumaktivierung der Sauren Muskelphosphatase. Von W. Kutscher und K. Schreier 255

Besprechung.

Triebel, E., Methodische und technische Fragen der Mikropaläontologie. (Ref.: M. Schwarzbach) 256

Ausgegeben im Februar 1949.

VIERTE AUFLAGE

BEILSTEINS HANDBUCH DER ORGANISCHEN CHEMIE

Zweites Ergänzungswerk *die Literatur von 1920 bis 1929 umfassend*

Herausgegeben und bearbeitet von

FRIEDRICH RICHTER

Siebenter Band *als Ergänzung des siebenten Bandes des Hauptwerkes XXXII, etwa 940 Seiten. 1948. DM 196.-*

Achter Band *als Ergänzung des achten Bandes des Hauptwerkes XXXI, etwa 660 Seiten. 1948. DM 141.-*

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

erscheinen vorerst etwa halbmonatlich und können durch jede Sortimentsbuchhandlung bezogen werden. Preis für 12 Hefte mit zusammen etwa 24 Druckbogen Mark 24.—, für das einzelne Heft Mark 2.50 zuzüglich Postgebühren.

Nachdruck: Der Verlag behält sich das ausschließliche Recht der Vervielfältigung und Verbreitung aller in dieser Zeitschrift zum Abdruck gelangenden Beiträge sowie ihrer Verwendung für fremdsprachliche Ausgaben vor.

Sonderdrucke: Den Verfassern von Originalbeiträgen und Kurzen Originalmitteilungen stehen 75 Exemplare kostenfrei zur Verfügung.

Anzeigen werden vom Springer-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Jebensstraße 1, angenommen. Die Preise wolle man unter Angabe der Größe und des Platzes erfragen.

Springer-Verlag

Berlin-Charlottenburg 2 Jebensstraße 1 — **Göttingen** Weender Straße 60

Redaktionelle Hinweise.

I. Allgemeines.

1. Bei der Einsendung von Manuskripten an „Die Naturwissenschaften" bittet die Redaktion die Herren Autoren, stets im Auge zu behalten, daß die Zeitschrift in erster Linie den Wünschen und Interessen des weiten Kreises ihrer Leser zu dienen hat und daß daher ihnen gegenüber Sonderwünsche der Herren Autoren in bezug auf Inhalt, Form und Umfang ihrer Veröffentlichungen zurücktreten müssen, falls die Redaktion dies für erforderlich hält.

2. Vor allem bittet die Redaktion, von der Einsendung von Aufsätzen Abstand zu nehmen, die nur für einen begrenzten Leserkreis verständlich und von Interesse sind, und die daher in einer Fachzeitschrift ihren richtigen Platz haben. Ausnahmen bilden knapp gefaßte Schilderungen der Ergebnisse eben fertiggestellter Arbeiten; für diese ist die Rubrik „K.O.M." („Kurze Originalmitteilungen") vorgesehen. Wegen Platz- und Papiermangels sind allerdings auch hier gewisse Einschränkungen nötig. In bezug auf den Inhalt: Angenommen werden können nur wirklich wichtige Arbeiten (z. B. keine bloßen Analogiearbeiten). In bezug auf den Umfang: Im Durchschnitt kann für eine einzelne K.O.M. nur der Raum einer Spalte (etwa 1000 Silben) zur Verfügung gestellt werden.

3. Autoren, namentlich solche, welchen die Gepflogenheiten bei Veröffentlichungen in den „Naturwissenschaften" noch nicht bekannt sind, werden gebeten, in die ausführlichere Darstellung der allgemeinen redaktionellen Richtlinien Einblick zu nehmen, welche in Heft 1 des 33. Jahrgangs abgedruckt sind. Ergänzend sei hier bemerkt, daß die Rubrik „Tagesnotizen" in Zukunft nicht fortgeführt wird, daß also Einsendungen für diese zwecklos sind.

II. Spezielle Hinweise.

Alle Sendungen und Zuschriften sind zu richten an:

Redaktion der Naturwissenschaften,
(20b) Göttingen, Bürgerstraße 50.

In sämtlichen Fällen erhalten die Autoren eine Bestätigung über das Eintreffen von Manuskripten sowie über deren Annahme oder Ablehnung. In den Aufsätzen sind seltene und nur einem kleinen Leserkreis verständliche Fachausdrücke nach Möglichkeit zu vermeiden oder in einer Fußnote kurz zu erläutern. Literaturzitate sind fortlaufend zu numerieren; die angeführten Arbeiten werden dann in einem Literaturverzeichnis am Schluß der Arbeit zusammengestellt. Bei Erläuterung des Textes durch Figuren ist überflüssiger Aufwand zu vermeiden. Figurenvorlagen für Strichätzungen sind so sorgfältig herzustellen, daß nach ihnen ohne weitere Rückfragen Reinzeichnungen angefertigt werden können. Diese werden zur Zeitersparnis den Autoren im allgemeinen nicht vorgelegt, sondern seitens der Redaktion kontrolliert.

Bei photographischen Abbildungen (Autotypien) kann das Druckergebnis auf dem heute zur Verfügung stehenden Papier nur in seltenen Fällen wirklich befriedigen. Es ist deshalb ratsam, Autotypien nach Möglichkeit zu vermeiden. In vielen Fällen läßt sich das Wesentliche durch eine Zeichnung ebensogut zeigen.

Korrekturen.

Die Autoren erhalten in jedem Fall eine Fahnenkorrektur, deren umgehende Erledigung und Rücksendung (mit einem Vermerk, ob der Beitrag druckfertig oder eine Revision erforderlich ist) erbeten wird.

OXYDKERAMIK

der Einstoffsysteme
vom Standpunkt der Physikalischen Chemie

Von Dr. Eugen Ryschkowitsch

Mit 132 Abbildungen · VI · 280 Seiten · 1948 · **DM 36.-**

Inhaltsübersicht: I. Allgemeine Grundlagen der Oxydkeramik: 1. Einleitung: Mehrstoff- und Einstoffsysteme. 2. Feinzerkleinerung. 3. Plastische Verformbarkeit oxydischer Massen. 4. Brennvorgänge an Einstoffsystemen. 5. Verbrennung und Hochtemperaturöfen. — II. Spezieller Teil: 1. Tonerde. 2. Spinell. 3. Magnesia. 4. Beryllerde. 5. Zirkonerde. 6. Zirkonsilicat. 7. Thonerde. 8. Cerdioxyd.

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

35. Jahrgang Heft 8*) 1948

Zur Problematik der Alchemie und ihrer Ausstrahlungen auf die modernen Naturwissenschaften.

Von Paul Walden.

Kaum eine andere naturwissenschaftliche Disziplin hat zu allen Zeiten sich einer solchen Popularität erfreut und eine so vieldeutige Beurteilung erfahren wie die allseits als „Goldmacherkunst" bekannte Alchemie. Nannte doch schon um 1300 ein Dante in seiner „Göttlichen Komödie" die Alchemisten „Affen der Natur", die für ihre Missetaten im tiefsten und furchtbarsten Teil der Hölle büßen müssen. Und nach mehr als einem Halbjahrtausend (1852) urteilte Joh. Scherr in seiner „Deutschen Kultur- und Sittengeschichte" über die als tiefsinnig gerühmten zahllosen Alchemistenschriften, daß „... die vielen dicken Folianten und Quadranten über das Geheimnis der Goldmacherkunst... einen namhaften Beitrag zur Geschichte der menschlichen Narrheit" darstellen. Dieses abfällige Urteil des Kulturhistorikers wird ergänzt durch das Urteil eines Chemiehistorikers, der zugleich eine Autorität für die *arabische* Alchemie ist, Julius Ruska, der resigniert feststellt (1934), „daß es sich in den meisten Fällen *nur* um Literatur, um endlose Ketten von Abschriften und freien Erfindungen der Autoren und nur selten um Überlieferungen echter Experimente handelt", sowie daß die allegorische Alchemie (1936) „... sich ewig im Kreise dreht und von wirklicher Naturwissenschaft so weit entfernt ist wie ein Kindermärchen von wirklicher Geschichte".

Doch hatte nicht ein Goethe die Idee des „Steins der Weisen" als eines in den irdischen Stoffen verborgenen Dinges bewundert, durch dessen Auffindung der Mensch in den Besitz der höchsten irdischen Wunschgüter Gold, Gesundheit und langes Leben gelangen kann: das Gold gibt die Macht, ohne Gesundheit gibt es kein Genießen, und das lange Leben tritt an die Stelle der Unsterblichkeit? Eine uneingeschränkte Anerkennung der Alchemie hatte dann Justus v. Liebig (1851) ausgesprochen und durch seine „Chemischen Briefe" einer weitreichenden Verbreitung zugänglich gemacht: „Die lebhafteste Einbildungskraft, der schärfste Verstand ist nicht fähig, einen Gedanken zu ersinnen, der vermögend gewesen wäre, mächtiger und nachhaltiger auf den Geist und die Kräfte der Menschen einzuwirken, als wie die Idee des Steins der Weisen. Ohne diese Idee würde die Chemie in ihrer gegenwärtigen Vollendung (d. h. 1851. P. W.) nicht bestehen, und um sie ins Leben zu rufen und in 1500 oder 2000 Jahren auf den Standpunkt zu bringen, auf dem sie sich heute befindet, würde sie aufs neue geschaffen werden müssen."

Bemerkenswert ist das im 20. Jahrhundert hervortretende Interesse für die Alchemie, das nicht ohne einen inneren Zusammenhang mit dem freiwilligen Radiumzerfall und den Elementenumwandlungen auf dem Gebiete der Atomphysik stehen dürfte. Als einen Beweis dieser geistigen Umorientierung möchten wir betrachten den im Jahre 1928 erfolgten Neudruck der „Geschichte der Alchemie" des gewissenhaft-gelehrten Professors Schmieder vom Jahre 1832, und zwar *ohne* Kommentar, obgleich Schmieder alle Adeptenlegenden von Golddarstellungen, Lebenselixieren usw. in das Gebiet bewiesener Tatsachen verlegt, und *obgleich* die Chemie über gediegene kritische Werke (großen Umfanges) zur Geschichte der Alchemie verfügt (z. B. von H. Kopp, „Alchemie", zwei Bände 1886, oder von E. O. von Lippmann, „Alchemie" 1919).

Nach Liebig ist der „Stein der Weisen" die conditio sine qua non für alle und jede wissenschaftliche Chemie des 19. Jahrhunderts. Stimmt das überhaupt, oder unter welchen Voraussetzungen? Und war der in den Vordergrund gestellte egoistische Trieb nach materieller Glückseligkeit durch Gold usw. wirklich das Hauptmotiv des „Steins der Weisen"?

Neuerdings hat man (z. B. Fr. Strunz) den „Stein der Weisen" in Korrelation gebracht zu fast allen Bezirken des menschlichen Sinnens und Wünschens: zum altorientalischen Weltsystem wie zum Tierkreis, zur Lehre vom Makrokosmos und vom Mikrokosmos, zur Symbolik des Welteneies wie zur Volksmedizin, zu den Zauber- und Edelsteinen wie zum Heiligen Gral und Wolfram von Eschenbach usw. usw. Wir meinen, der „Stein der Weisen" ist Wahrheit und Dichtung zugleich: seine Grundlagen sind unvollständige Erfahrungen der Praxis, gepaart mit frühzeitigen Wünschen und Ahnungen der Menschenseele.

Man hat gesagt: „Alchemie war immer auch Metallurgie, Erz- und Metallprobieren, Arzneikunde, Destillation, Juweliergewerbe, Glockengießen, Salpeter- und Seifensiederei, Lohgerberei, Färbereigewerbe, Goldimitation, Glastechnik usw." (Fr. Strunz, 1944). Es erinnert dies an die vor hundert Jahren von Liebig vertretene Ansicht von der Rolle des „Steins der Weisen" (vgl. o.). Grundsätzlich werden hier zeitlich und räumlich unbegrenzte Ansprüche erhoben, die besagen, daß — *begrifflich* genommen — alle und jede Stoffwandlungen und Stoffveredlungen im Banne und Sinn der Alchemie und ihrer betont materialistischen Ziele erfolgten, und daß — *sachlich* gesehen — alle stoffverwandelnden (d. h. chemisch-technischen) Gewerbe und mit ihnen auch die (chemischen) Erkenntnisse von den Eigenschaften und Veränderungen der Stoffe wesensmäßig *mit* der Alchemie verknüpft sind bzw. eigentlich erst seit der Alchemie möglich wurden.

Sinngemäß hätte man dann zu folgern, daß — *erstens* — vor dem Auftreten der Alchemie *keine* chemische Technik existenzfähig gewesen ist, *zweitens: mit* der Alchemie überhaupt erst ein sichtbares Hervortreten der chemisch-technischen Gewerbe usw. bemerkbar wird, und *drittens:* daß eine geistige Beeinflussung zwischen den Alchemisten (als Gliedern eines gehobenen bzw. geistigen Standes) und den Praktikern (als Gliedern einer geschlossenen Zunft) den Normalzustand gebildet hat. Es hat nun Jahrtausende *vor* der Alchemie eine chemisch-technische und zugleich hochentwickelte Praxis gegeben, und daß die Praktiker aus den in allegorisch-parabolischer Schreibart verfaßten alchemistischen Schriften etwaige Anregungen empfangen hätten, zumal diese

*) *Ausgegeben im Februar 1949*

Schriften den Alchemisten selbst unverständlich blieben, ist nicht ganz wahrscheinlich! Die philosophierenden Alchemisten ihrerseits blickten auf die Praxis mit den gleichen Gefühlen wie zuvor die griechischen Philosophen auf *ihre* zeitgenössischen Technites-Banausen. Da die Namen- und Sinngebung der „*Chemia*" (oder „Chemeia") als einer goldmachenden Kunst etwa seit 300—400 n. Chr. (seit Zosimos) datiert und die arabische Bezeichnung Al-Kimia (= Alchimie) erst durch die Begründung des Kalifats von Cordoba (711 n. Chr.) im Abendlande verbreitet wurde, so ist — historisch gesehen — jede technische Epoche *vor* einer begrifflichen Alchemie als eine *selbständig* entstandene und weitergewachsene Kulturschöpfung zu bewerten.

Übrigens sind die modernen Fürsprecher der Alchemie alchemistischer als die arabischen Alchemisten selbst, denn diese erklären übereinstimmend — noch im 14. Jahrhundert z. B. durch den arabischen Gelehrten Alakfani: „Al Kimijâ ist die Kunst, aus unedlen Metallen Gold und Silber zu machen." Auch der als Theoretiker und Praktiker der Alchemie gepriesene Abu Bakr Muhammad ibn Zakarija al-Razi (= Rhazes, gest. 925) verfolgt in seinem Werk „Geheimnis der Geheimnisse" bei allen chemischen Umsetzungen das Endziel, die Transmutation: „So Allah es will." Daß diese reservatio mentalis angezeigt war, beweist ein Zeitgenosse Alakfanis, der gelehrte Ibn Khaldun mit seiner Feststellung: „Niemals hat die Al Kimijâ oder der Stein der Weisen einen Erfolg gezeitigt, niemals hat sie einen Armen reich gemacht." Und wie ein Dante, so erklärte auch Leonardo da Vinci (gest. 1519) die Alchemie für eine lügnerische und verderbliche Kunst, da die künstliche Golddarstellung ebenso unmöglich wäre wie die Erfindung des Perpetuum mobile. Ein Praktiker und scharfer Beobachter, Angelus Sala, warnte (1632) vor der alchemistischen „Spekulation und Imagination": „Denn was kein Gold ist, das kann weder ich noch jemand anders realiter in Gold verwandeln."

Fast unerklärlich erscheint die historische Tatsache, daß die größten Philosophen und Naturforscher des *13.* Jahrhunderts, ein Albertus Magnus, ein Roger Bacon, ein Raymundus Lullus, auch ein Thomas von Aquino, sich *für* die Transmutation erklären und die Alchemie voll anerkennen. Und nicht weniger verwunderlich hört es sich an, daß zwei der größten Denker im *17.* Jahrhundert, Leibniz und Newton, weitgehende Interessen für die Alchemie bezeugten, indem sie jahrelang alchemistische Studien betrieben. Ihnen allen — den mittelalterlichen Philosophen-Mönchen, wie den beiden neuzeitlichen Denkern — ging es ja gar nicht um das „Goldmachen" aus Gewinnsucht. Was war es, das die größten Geister zu der Alchemie hinzog?

Griechische Naturphilosophie als Grundlage der Metallwandlung.

Praktisch gesehen ist die Alchemie (als eine goldmachende Kunst) die natürliche Fortsetzung einer orientalisch-ägyptischen Edelmetall-, Edelstein- und Farbentechnik. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus möchten wir die Alchemie oder genauer: die Transmutationsidee der Metalle als eine Popularisierung (bzw. Übertragung in die Praxis) der antiken Naturphilosophie bezeichnen, als „eine Probe aufs Exempel", nämlich die Verwirklichung der klassischen Theorien vom *Wesen der Materie.* Diese Bestrebungen gingen von Alexandrien aus, wo die griechischen philosophischen Schriften und Studien eine besondere Pflege gefunden hatten. Durch die Araber als Übersetzer und Kommentatoren kamen ja auch z. B. die Lehren des Aristoteles über Spanien nach Mitteleuropa, und durch Albertus Magnus wurden auch die Physik und Metaphysik des Aristoteles mit den Dogmen der abendländischen Kirche verschmolzen. So gesehen ist dann die lange Entwicklungsperiode der Chemie des Mittelalters bis 1500 (bzw. bis zur Jatrochemie des Paracelsus) ein geistiges Ringen um das aristotelische naturwissenschaftliche Weltbild unter dem Schlagwort „Alchemie".

Im Vordergrunde der Problematik standen die *Metalle*[1]), und zwar von der *dynamischen* Seite gesehen: *Wie entstehen sie? Woraus sind sie zusammengesetzt? Wie lassen sie sich künstlich herstellen?* Der griechische Genius ging bei der gedanklichen Lösung des Metall- bzw. Stoffproblems von dem Prinzip der Einfachheit aus, er bediente sich z. B. der folgenden Axiome, die in die Alchemistenmentalität eingingen:

1. allem Seienden liegt *ein* Urelement (*Thales*: Wasser) zugrunde, alles ist aus *einem* Urstoff („Hyle", „Protyl": Plato, Aristoteles; „materia prima" der *Alchemisten*) entstanden — die griechisch-alchemistische Philosophie prägte den Satz: „Hen to pan";
2. alles befindet sich in dauerndem Fluß (Heraklit: „Panta rhei"), alles besteht durch ein ewiges Entstehen und Vergehen;
3. „Nichts geschieht von selbst, sondern alles infolge eines begreiflichen Grundes" (Leukipp);
4. die Elemente (und Stoffe) wirken aufeinander (als beseelte Dinge) durch Liebe und Haß (Empedokles), aus *vier* Elementen — Wasser und Erde, Feuer und Luft — ist alles geworden (Empedokles);
5. durch Zufall und blinde Mechanik ist aus den unendlich vielen, unzerstörbaren, in ewiger Wirbelbewegung befindlichen, ihrer Substanz nach gleichen und beseelten *Atomen* das Weltall als eine Einheit entstanden (Demokrit);
6. „Nichts kann werden aus nichts, und nichts kann vergehen in nichts" (Demokrit). „Ex nihilo nil fit. Nil fit ad nihilum" (Epikur, Lucrez);
7. die *vier Elemente* (= Eigenschaften) Feuer, Luft, Wasser, Erde (vgl. 4) sind ineinander überführbar, indem die Umwandlung vom Feuer bis zur Erde wie rückwärts von der Erde bis zum Feuer geht (Plato im „Timäus"; Aristoteles). Die Alchemisten ergänzten sie durch einzelne bestimmte Stoffe, die insbesondere für die Metalle in Betracht kamen, nämlich durch Quecksilber (Mercurius) als den Repräsentanten des chemisch-metallischen Wesens und durch Schwefel (Sulfur) — der chemischen Eigenschaft der Verbrennlichkeit (Raymundus Lullus; Geber), zuweilen noch durch Arsenik (Albertus Magnus; Geber);
8. die Metalle *wachsen* durch Luftzutritt in den Eingeweiden der Erde, und in abgebauten Strecken der Bergwerke wachsen die Erze nach (Aristoteles): demnach sind
9. die Metalle zusammengesetzte Legierungen (alexandrinische *Alchemisten*), aus wechselnden Verhältnissen von Schwefel und Quecksilber (bzw. Arsenik) und in verschiedenen Graden von deren Reinheit bestehend (Lullus, Albertus Magnus, Geber usw.);
10. Wachstums- und Umwandlungsvorgänge der Metalle bedeuten alchemistisch eine Ergänzung

[1]) An den Metallen bzw. den gediegen vorkommenden *Bunt-* (oder Edel-)*Metallen* Gold, Silber, Kupfer offenbarte die *Natur* selbst — in der Frühzeit der Kultur — die Existenz von chemischen Elementarstoffen, und es war wohl die *Metallpraxis*, die den Menschen zu einer *Philosophie* der Materie hinführte.

und *beschleunigte* Vollendung der Natur durch die „Kunst" (Geber);

11. es lehrte Aristoteles, daß alles menschliche Gestalten-Umbilden (τεχνη) eine Nachahmung der Natur darstellt, und Scholastiker-*Alchemisten* stellten den Satz auf: „Ars imitatur naturam quantum potest";
12. die *alchemistische* Kunst erreicht diese Metallveredelung (Transmutation) in kurzer Zeit durch das besondere Mittel des „Steins der Philosophen" (auch Tinktur, Elixier, Xerion genannt).

Die Alchemie der Mystiker-Philosophen des Mittelalters.

Dies war das geistig-naturphilosophische Rüstzeug der Alchemisten sowie der scholastischen Philosophen und mönchischen Mystiker des Mittelalters, mit demselben operierten sowohl die betrügerischen (und betrogenen) „Goldmacher" als auch die ernsten, experimentierenden „*Sucher*" des Steins der Weisen — diese allerdings völlig ergebnislos —, als auch drittens jene großen und gläubigen *Mönche* und *theoretischen Alchemisten*, die eine mystische Ausweitung der Alchemie und der Wirkung des Steins der Weisen in die Wege leiteten. Es waren dies die bereits oben als Philosophen gekennzeichneten drei Mönche[2]), der Dominikaner Albertus Magnus (1193—1280), Roger Bacon (1214—1292) als englischer Franziskanermönch, und der aus Spanien stammende Minoritenmönch Raymundus Lullus (1235—1315). Sie alle bejahen die alchemistische Metallumwandlung, die prima materia des Aristoteles, die Zusammengesetztheit der Metalle (aus Quecksilber, Schwefel, Arsen), die Existenz von „Medizinen" (Elixieren), die Unedles in Edles verwandeln, auch das Universalheilmittel, das des Menschen Körper verjüngt und das Leben verlängert (R. Bacon, R. Lullus); übrigens sah Albertus selbst „... Gold im Rhein und in der Elbe *entstehen*".

Nach Albert dem Großen stellt die Alchemie die Zusammengehörigkeit und Allverbundenheit von Leben und Sein in der Welt dar. Für Roger-Bacon ist die Alchemie nur ein Werkzeug des Dogmas, ein Ausdruck der menschlichen Sehnsucht nach Erkenntnis alles Seins und Wandels. Und für Raymundus Lullus ist die alchemistische Kunst Gnade Gottes im Dienste der Lenkung des Menschen und der Natur. *Wie soll man nun forschen und zur Erkenntnis gelangen?* Der hl. Thomas von Aquino (gest. 1274), Schüler von Albert, hatte erklärt, daß das Streben nach Erkenntnis der Dinge eine Sünde sei, sofern es nicht auf die Erkenntnis Gottes ziele. Und so ist auch für unsere drei Mystiker-Alchemisten das Ziel, die Wunder der Natur als Zeugnisse der Kraft Gottes zu erkennen und dadurch den Weg zu Gott zu verringern. Alles Wissen — sagt Albert — ist nur ein Hinschreiten zum Ziel alles Wissens, zu Gott; ihn zu erkennen und in Liebe zu besitzen, sei die Sendung der vernunftbegabten Menschenseele — „Mit Ehrfurcht beginnt die Wissenschaft und durch Liebe wird sie vollendet" (Fr. Strunz). Und nach Roger Bacon ist alles aus Gott begreifbar, alle Wissenschaften sind wie Augen, mit denen man Gott ansieht und die Natureroberung ist Gottesdienst — die Lehren der Philosophen und Alchemisten sind Offenbarungen Gottes. Bacon als Schöpfer des Begriffes „scientia experimentalis" lehrt drei Wege der Erkenntnis: Autorität, Ratio und Experiment, doch die Erfahrung ist mehrfach, und zwar eine äußere und eine innere, außerdem noch „göttliche Inspirationen, seelische Schauungen, übernatürliche Zustände". Raymundus Lullus nimmt keine Grenze zwischen dem Rationalen und Irrationalen oder zwischen der natürlichen und der Offenbarungsweisheit an; der *Glaube* sei die Vorbedingung für alle Vernunfterkenntnisse und Verstandesschlüsse, durch ihn vermöge man alle natürlichen oder übernatürlichen Wahrheiten a priori abzuleiten, und auch in der *Alchemie* gebe es neben der sinnlichen Wahrnehmung noch eine höhere oder schöpferische Erkenntnisart, die einer göttlichen Erkenntnis der allgemeinen Prinzipien gleichkomme. *Er* war es, dessen Bildnis die Nachwelt mit dem Spruchwort umgab: „Lux mea est ipse Dominus." *Er* sollte sich erboten haben, ein *Meer* in Gold zu verwandeln, „si mercurius esset", und *ihm* schrieb die Nachwelt etwa 500 Werke alchemistischen Charakters zu! *Er*, der im Leben *keine* alchemistischen Versuche ausgeführt hatte, wurde nach seinem Tode zu einer Leuchte der Alchemie gemacht, eröffneten doch seine Lehren den Weg zu den kühnsten alchemistischen Spekulationen und Extrapolationen, boten sie doch die Möglichkeit, dem „Stein der Weisen" Leistungen zuzuschreiben, die die Grenze zwischen dem Erhabenen und dem Lächerlichen streiften.

Wer soll diesen wunderreichen „Stein der Weisen" suchen und wiederfinden? Wie soll man ihn gebrauchen? Schon Zosimos hatte (wohl im Hinblick auf die ägyptischen Tempelkünste und Priesterriten) von dem „heiligen" oder „göttlichen Werk" gesprochen, von „göttlichen Mysterien", die nur den Würdigen, den Berufenen durch die „Gnade Gottes" offenbart werden. Auch den drei Mystikern ist das Forschen und Erkennen in der Alchemie eine sakrale Handlung, ein Gottesdienst, dazu nur die Gottgefälligen, Frommen, Gläubigen berufen sowie durch Gebet und Askese vorbereitet sind. Und wiederum, wie tausend Jahre zuvor, wird eindringlichst vor einem Mißbrauch des göttlichen „Steines" gewarnt, etwa zur Selbstbereicherung aus Habsucht, zur Machterweiterung, aus Ruhmsucht usw. — die Schuldigen verfallen mit Kind und Kindeskind einer göttlichen Strafe an Leib und Seele. Dagegen soll man das gewonnene künstliche Gold zu gottgefälligen Werken verwenden, z. B. zur Linderung von Not, Armut und Elend, zum Bau von Hospitälern, Kirchen usw.

Überschauen wir das Gesagte, so müssen wir in der Stellungnahme der Mystiker zur Alchemie eine neue Phase der Entwicklung derselben erblicken, die arabisch-ägyptische materielle Alchemie wird auf eine höhere, eine geistige Ebene gehoben: an Stelle des alten *Zieles* — die Goldherstellung als Selbstzweck und Erwerb — wird fernerhin das Gold nur eines der Mittel zum höheren Ziel, nämlich zur *körperlich-seelisch-geistigen Vervollkommnung des Menschen*, und der *Weg* der Erkenntnis — als eine Gnade Gottes und ein Hinschreiten zu Gott — ist nicht so sehr auf der Erfahrung aus der Außenwelt, als vielmehr auf der schöpferischen Potenz der eigenen Innenwelt sowie auf den göttlichen Erleuchtungen, Offenbarungen usw. begründet. Diese mönchisch-mystische Alchemie ist gekennzeichnet durch Gottgläubigkeit, Demut und Uneigennützigkeit. — Die großen Mönche-Mystiker lebten und wirkten im Geiste des mittelalterlichen Armutsideals. Die nachher zu erwähnenden Ziele dieser Alchemie dürften daher schwerlich als Wegbereitung der modernen Technik mit ihren ins Prometheisch-Faustische gehenden Leistungen und Planungen gelten (wie es neuerdings verschiedentlich ausgeführt wird): *dort* war alles zur Ehre und Erkenntnis Gottes — und „so Gott es will" — gedacht, *hier* dient alles zur Verdeutlichung der

[2]) Alle drei sind auch bedeutende Naturforscher: Albert der Große ist besonders als Biologe hervorgetreten, Rog. Bacon ist als Physiker bekannt, und Raym. Lullus hat sich durch seine auf mechanischen Prinzipien beruhende „Ars magna" oder „große Erfindungskunst" bei den Zeitgenossen in ein hohes Ansehen gesetzt.

menschlichen Leistungskraft und des menschlichen Willens.

Diese Neuorientierung der Alchemie des Mittelalters mit der auf das Psychisch-Biologische gerichteten Zielsetzung könnte auch als eine Art Renaissance der antiken Ziele der Naturphilosophie gewertet werden, denn es ging dort (z. B. in der stoischen Philosophie) nicht um materielle Erkenntnisse, sondern um seelische Veredelung, Selbstüberwindung, weise Lebensführung usw.

Einzelziele der mystischen Alchemie.

Eine Analyse der in der mystischen Alchemie durch den „Stein der Weisen" erstrebten Leistungen ergibt ein Programm, das man als überspannt, unsinnig usw. abzutun bestrebt gewesen ist. Doch handelt es sich um ernstzunehmende und in anderthalb Jahrtausenden gereifte Ausflüsse der Mentalität der mittelalterlichen Menschheit, um Ziele, die eine das gewöhnliche *Naturwalten überragende Naturbeeinflussung zum Zweck der Wandlung des Menschen* selbst verfolgten. Was vermag der „Stein der Weisen"?

1. Der „*wahre*" *Philosophenstein* vermag in geringsten Mengen vieltausendmal größere Mengen der unedlen *Metalle* „ausreifen" zu machen bzw. in Gold und Silber umzuwandeln;
2. er wandelt auch den *Körper des Menschen* um, indem er die Krankheiten heilt, die Gesundheit und Kraft spendet, die Alten jung macht und ein langes Leben verleiht;
3. er wirkt auch auf des Menschen *Seele*, indem er ihn demütig, fromm, gütig und gleichgültig gegen alle Übel macht;
4. der „Stein" vermag auch den menschlichen *Geist* zu steigern und zu läutern, er macht den Menschen weise und wissend, sowie die Stimmen der Natur (der Tiere, Vögel, Käfer usw.) verstehend;
5. der in Wasser gelöste Stein, auf *Pflanzen* gegossen, befördert deren Wachstum, Befruchtung und Zeitigung.

   In *frommen* Händen vermag der Stein
6. auch *Tote* zum Leben zu erwecken;
7. aus der *Asche* der Pflanzen diese wieder hervorgehen zu lassen sowie
8. aus geeigneten Stoffen einen *künstlichen Menschen* (homunculus) zu machen. Ferner
9. führt er auch Steine in *Edelsteine* über und
10. vermag er, „kranken" (vergorenen usw.) Wein in guten, sowie sprödes (brüchiges, also „krankes") Glas in veredeltes, hämmerbares überzuführen.

Es ist überflüssig zu betonen, daß keines dieser Ziele erreicht worden ist. Und doch galten sie als realisierbar. Jede Zeitepoche hat ihre Psychologie mit den entsprechenden Problemen und Forschungsmitteln. Warum sollte bei einer innigen Gottgläubigkeit und Frömmigkeit die Verwirklichung dieser romantisch-idealen Ziele unmöglich sein? Lag doch denselben ein hohes Ethos zugrunde: die Veredelung des Menschen — „so Gott es will" — durch Beseitigung der „Krankheit" der Armut, der Zeitbedingtheit und Gebrechlichkeit des Leibes sowie der Krankheiten der Seele. Man kann auch das mystisch-alchemistische Programm in Parallele setzen zu den „Utopien" des 16. und 17. Jahrhunderts eines Thomas Morus („Utopia", 1506), eines Campanella („Sonnenstaat", 1623), eines Lord Bacon („Nova Atlantis", etwa 1619). In diesen Werken wurden programmatisch neue politisch-soziale Ideal*staaten* gegeben, während die alchemistischen Mystiker, gleichsam als Pendant dazu, den Ideal*menschen* heranbilden wollten.

Daneben möchten wir in jenem alchemistischen Arbeitsprogramm noch etwas anderes erblicken, nämlich eine Vorschau auf Kulturprobleme und wissenschaftliche Zielsetzungen einer kommenden Zeit.

Ausstrahlungen der alten Alchemie auf moderne Probleme der Naturforschung.

Als der 62jährige Goethe seine Lebenserinnerungen niederschrieb, verweilte er auch bei dem in seinen Jugendjahren emsig betriebenen Studium alchemistischer Schriften und dem tiefen Eindruck derselben, da in ihnen „... die Natur, wenn auch vielleicht auf phantastische Weise, in einer schönen Verknüpfung dargestellt sei". Es war der *Einheits- und Ganzheitsbegriff*, der die *Weltanschauung* jener Alchemistenperiode bildete. Und ist es nicht so, daß heute wiederum die moderne Naturphilosophie sich zu diesem Begriff bekennt, die *Welt* als Ganzes begreifen will und ihre Einheit nach Baumaterial, Bauplan, Kräften und Gesetzen lehrt? Der *Urstoff* der Antike, der gemeinsam mit dem Begriff der Elemente von den Alchemisten weiterkultiviert, von Paracelsus durch seine „Tria prima" erweitert worden war, kehrt er nicht wieder in den bald hundert stofflichen chemischen *Elementen*, die aus dem *Proton* bzw. dem modernen „Tria prima" Proton, Neutron und Elektron zusammengesetzt sind?

Die *Zusammengesetztheit und Konstitution der Metalle* war ja ein Denkproblem und Axiom der antiken wie der alexandrinischen Philosophen — *dieses Axiom* löste erst die eigentliche Alchemie aus und wurde in weiterer Folge der Leitgedanke bei der begrifflichen Bestimmung und experimentellen Erfassung der „chemischen Elemente". Über der „Zusammengesetztheit" der Metalle strauchelten die Alchemisten, da sie in den unedlen Schwermetallen andauernd Goldspuren fanden. Ein Jungius (1642) ebenso wie ein Boyle (1661), die den *Begriff* des „chemischen *Elementes*" aufstellten, scheuten sich davor, die Metalle als *Belege* dafür zu nennen; einem Lavoisier (1789) sind sie nur zeitbedingte Elemente, „...weil wir kein Mittel haben, um sie zu zerlegen", und als Berzelius (1808) durch Elektrolyse ein Ammoniumamalgum erhalten hat, diskutiert er mit Davy über die zusammengesetzte Natur der Metalle! Der Physiker-Chemiker Örsted (1812) schreibt: „Fragen wir uns selbst, *was ist jetzt das große Problem der Chemie*?, so werden wir ohne allen Zweifel antworten müssen: *die Zerlegung und Zusammensetzung der Metalle*... Ohne diese in ihrem *Innern* zu kennen, wird man sich nie von der Verschiedenheit der übrigen Körper eine gründliche Rechenschaft geben können." Im Jahre 1816 grübelt der geniale fünfundzwanzigjährige Physiker Faraday über das gleiche Problem und sagt: „To *decompose the metals* then, to *reform* them, to *change* them one to another, and to *realise* the once absurd notion of transmutation, are the problems now given to the chemist for solution..." Und im Jahre 1819 erklärt der Elektrochemiker Th. v. Grotthuß: „Auf jeden Fall halte ich es für gewiß, daß alle Metalle —E (d. h. Elektronen!) chemisch gebunden enthalten." Im 20. Jahrhundert, dank der durch M. v. Laue (1912) entdeckten Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen an Kristallen, sind wir endlich zur Erkenntnis des Metallinnern, zu den Gitterstrukturen, vorgedrungen und erblicken im festen Metall positiv geladene Metallrümpfe und leichtbewegliche Elektronen. Ein weiter Weg und ein zum Nachdenken reizender Erfolg!

Die Idee eines Plato und Aristoteles vom *Urstoff* (Protyl, materia prima) durchzieht wie ein roter

Faden die Gedanken- und Arbeitswelt der Alchemisten; ein Paracelsus ebenso wie ein Boyle huldigen ihr; ein englischer Arzt Prout (1815) äußert auf Grund der seinerzeitigen ungenauen und vielfach ganzzahligen Atomgewichte die Ansicht, es könnte vielleicht der Wasserstoff (als Einheit dieser Ganzzahligkeit) die von den antiken Philosophen vermutete Urmaterie sein. Es bedarf der exakten Atomgewichtsbestimmungen von Berzelius, Marignac, Stas u. a., um die vermeintliche Ganzzahligkeit zu widerlegen. War aber damit die Unhaltbarkeit des Proutschen Aperçus erwiesen? Hatte nicht 1865 A. Kekulé es als möglich hingestellt, „... daß die Atome eines und desselben Elementes nicht die identische Größe haben", daß also durch irgendeine Reaktion „... ein Sieben der Atome stattfindet"? Und 1886 erwog Will. Crookes („Genesis der Elemente") die Möglichkeit, daß es z. B. Calciumatome geben könnte, deren Mehrzahl Ca = 40 ist, während eine geringe Anzahl das Akt.-Gew. 39 und 41, eine noch geringere das Akt.-Gew. 38 oder 42 usw. besitzt? Die moderne Atomforschung hat zeigen können, daß tatsächlich der Wasserstoff (durch Protonen) den Atomkern bildet, sowie daß solche vermutete Elemente mit verschiedenem Atomgewicht (als Isotope) durch Aston 1920 genau bestimmbar geworden sind.

Seit jeher erregten die zu sinnfälligen Veränderungen führenden (*chemischen*) *Vorgänge* zwischen den verschiedenen Stoffen das besondere Interesse des Menschen. *Was* geschieht dabei? *Wodurch* geschieht es? Demokrit ließ seine Atome in ewiger Bewegung sein, sich schieben, stoßen, anhaken, anhaften; sie waren „beseelt" und als tanzende Atomwirbel[3]) durch mechanisches Zufallsspiel zum Zusammenkleben und zur Bildung eines neuen chemischen Körpers bestimmt. (Allerdings hatte Demokrit selbst den *Zufall* „einen Deckmantel der eigenen Ratlosigkeit" genannt.) Empedokles hatte, gleichzeitig, statt der mechanischen Ursachen seelische *polare* Eigenschaften — Liebe und Haß — für die Wechselwirkung der Elemente und Stoffe verantwortlich gemacht. Wenn wir nun heute eine hochentwickelte chemische Dynamik haben und allem chemischen Geschehen die chemische *Verwandtschaft* oder *Affinität* zugrunde legen, so merken wir kaum, wie anthropomorph diese Bezeichnungen sind, die uns in die mystische Denkwelt von Albertus Magnus, dem Schöpfer dieses Begriffes, zurückversetzen. Einst belächelte man nachsichtig die Demokritischen „beseelten" Atome und deren sinnloses Sichstoßen und Wirbeln im leeren Weltenraum; heute operiert die strenge Wissenschaft wiederum mit Stoßzahlen und Stoßvorgängen, mit Dreierstößen und Dreierstoßkatalysen in der chemischen Reaktionskinetik, die Stelle der mechanisch wirkenden Atomwirbel haben Elektronenwirbel und Elektronenwolken eingenommen, auch den Elektronen und Atombausteinen werden „seelische Beschaffenheiten" beigelegt, und sogar der Demokritische Zufall wurde bemüht, um z. B. das erste „Eiweißleben" in die irdische Welt zu bringen. Die modernen Atome müssen auch als innerlich bewegt gedacht werden.

Das „Panta rhei" des alten Heraklit fand seinen Ausdruck in den *gegenseitigen* und *rückläufigen Umwandlungen* der Elemente: Feuer (bzw. Kraft) ⇄ Luft ⇄ Wasser ⇄ Erde; es dokumentierte sich in der Ansicht des Aristoteles, des Albertus Magnus, der Alchemisten und Praktiker vom natürlichen Wachsen bzw. Nachwachsen der Erze und Metalle sowie in der Lehre von der *künstlichen* Umwandelbarkeit der unedlen Metalle. Ganz allgemein: Das Prinzip dieses „Fließens" prägt sich in der imposanten *Dynamik* des ganzen mystisch-alchemistischen Programmes aus, es erhebt sich zum Normalzustand des Seins und Geschehens, in dem freiwillig verlaufende und durch den „Stein" herbeizuführende Umwandlungen und Umkehrungen sogar das Leben und den Tod überbrücken. Man tötete ja auch die Metalle, unterwarf auch die Steine (z. B. Gips, Kalkstein) dem „Totbrennen" und der „Wiederbelebung". Die *moderne* Wissenschaft operiert ihrerseits mit dem Begriff des „Fließgleichgewichts" und mit dem freiwilligen Abbau und künstlichen Aufbau der Elemente usw.

Aus dieser dynamischen Einstellung resultierte für die mittelalterliche Denk- und Arbeitsweise ein anderer folgenreicher Begriff, denn zwangsläufig gelangte man zu der Frage: „*Wie* läßt sich z. B. die Goldumwandlung *zeitlich abkürzen* und der *Menge* oder Ausbeute nach günstig beeinflussen?" Schon Geber (XIII. Jahrh.) lehrte, daß die *natürliche* Entwicklung des Goldes aus den unedlen Metallen viele Jahre brauche, während die „Kunst" mit Hilfe des „Steins der Weisen" Wachstum und Reifung des Goldes auf Tage und Stunden abzukürzen vermöge. Dies besagt, daß der „Stein der Weisen" nicht allein als *Lenker der Reaktion* nach ihrem *Wesen*, sondern auch als *Beschleuniger des Bildungsvorganges* selbst wirken kann, und zwar tut er dies durch sein bloßes Zwischentreten in geringer Menge, ähnlich dem „*Ferment*" oder Sauerteig beim Brotbacken. Es war der durch seine Phlogistontheorie berühmt gewordene Hallenser Chemiker-Arzt Georg Ernst Stahl, der 1697 in seiner Schrift „Zymotechnia Fundamentalis seu Fermentationis theoria generalis" nicht nur das Phänomen erfaßt, sondern erstmalig nach seinem Wesen definiert hat. Die Fermentation beruht auf einer Lostrennung der Teilchen des Fermentierten durch das Ferment, das *keineswegs* „den Actum der Fermentation schlechterdings festsetze, verursache oder hervorbringe. Keineswegs... sondern es *befördert* dieser Begriff *nur den Actum, daß er in kurzer Zeit* vollführt wird... *Das Ferment befördert und beschleunigt nur den Actum*...." Hier tritt uns erstmalig die Begriffsbildung für die Fermentwirkung entgegen. Bekanntlich erfolgte in einer Art geistiger Stufenreaktion die Erweiterung dieses *Begriffes* im Jahre 1835 durch J. J. Berzelius zum *Katalysator* und zur *Katalyse*, um in dritter Stufe, durch Wilh. Ostwald mit der Reaktionsbeschleunigung kombiniert (1894/1901), sich mittlerweile zu einer wissenschaftlichen Großmacht zu entwickeln.

Der „Stein der Weisen" wird in unserer Liste der mystisch-alchemistischen Leistungen zu einem Ferment oder Katalysator „Kat' exochen": der „Stein" katalysiert nicht nur die Gold- und Edelsteinbildung (vgl. 1 und 9), sondern auch die größten *biologischen* Vorgänge an lebenden Menschen — als Vorahnung der modernen „*Wirkstoffe*" (Hormone, Vitamine usw.) — sowie an Pflanzen (als Wuchsstoffe oder Pflanzenhormone); als ein „Überkatalysator" greift er auch in das *seelisch-geistige Gebiet* hinüber, ja er wird sogar ein Träger der Chromosomen und der Lebenskeime (vgl. die Beispiele 2—4 bzw. 5 sowie 6 bis 8).

Im Zusammenhang mit der Katalyse stehen auch die insbesondere durch die Atomenergie aktuell gewordenen „*Kettenreaktionen*": auch diese moderne Begriffsbildung hat ihre ehrwürdigen Vorgänger, die teils auf die alten alchemistischen Goldmacher des 14. Jahrhunderts, teils auf Stahls Fermentbegriff

[3]) Man erinnere sich noch der Traumgesichte A. Kekulés (1890) von den tanzenden, sich stoßenden, „in Wirbeln sich drehenden" Atomen, die ihn zur Konzeption der Struktur- und Benzoltheorie geführt hatten (1858, 1865).

zurückweisen. In einem Rezept des *Pseudo*-Raymundus-Lullus heißt es wörtlich vom „Stein der Weisen" (oder „Medizin", „Tinktur"):

„... Nimm von dieser köstlichen Medizin (d. h. dem Stein der Weisen oder Xerion-Elixier) ein Stückchen so groß wie eine Bohne. Wirf es auf tausend Unzen Quecksilber, so wird dieses von der Medizin in ein rotes Pulver verwandelt. Von diesem gibt man eine Unze auf tausend Unzen Quecksilber, die dann in ein rotes Pulver verwandelt werden. Davon wieder eine Unze auf tausend Unzen Quecksilber geworfen, so wird alles zur Medizin. Derselben eine Unze wirf auf tausend Unzen neues Quecksilber, so wird es ebenfalls zur Medizin. Von dieser letzteren Medizin wirf nochmals eine Unze auf tausend Unzen Quecksilber, so wird es ganz in Gold verwandelt, welches besser (!) ist als das Gold aus den Bergwerken." Die Wirkung der „Medizin" erstreckt sich insgesamt auf $1000^5 = 10^{15} = 1000$ Billionen Teile Quecksilber!

Stahl (1697) erläutert den chemischen Mechanismus der beim Fermentieren *losgerissenen Partikeln* („Radikale" in heutiger Ausdrucksweise), daß sie nun *ihrerseits „... die Beschleunigung solcher Losmachung sehr merklich befördern und eben hierdurch gleichsam besondere Instrumenta oder Hebezeuge zur Durchbrechung dieses Zusammenhanges abgeben ..."* (Solche „losgerissenen" Radikale wirken auch z. B. in den Kettenreaktionen bei den Oxydationen der Paraffinkohlenstoffe zur modernen Fettsynthese, bei der Kautschuksynthese usw. mit.)

Was ist nun eigentlich nach Alchemistenbegriffen dieser so allmächtige *„Stein der Weisen"*? Dieser „Stein" — sagen die Alchemisten — ist eigentlich kein Stein, er wird auch ein Zauberkraut genannt, oder er ist das metallwandelnde Xerion-Streupulver oder die goldgebende Tinktur, oder er ist die Universalmedizin oder Lebenswasser, Panacee usw.; er ist ein Stoff oder auch Kraftzentrum, eine *unirdische* Potenz, je nach den Versuchsbedingungen und Leistungen. (Man denke auch an das moderne Elektron). —

Indem wir unseren historischen Querschnitt durch mehr als zwei Jahrtausende beenden, möchten wir die Alchemie, die den längsten Zeitraum beansprucht, mit kurzen Worten charakterisieren. Vom Standpunkt einer wissenschaftlichen Experimentalchemie ist die Alchemie besonders bemerkenswert einerseits durch die fehlenden Erfolge auf dem Gebiete *eigener* experimenteller Forschungen, andererseits durch die Fülle und Weite ihrer mittels *Spekulation* erarbeiteten *Zukunftsaufgaben* der Chemie. Hierbei tritt die Kontinuität, das Beharrungsvermögen bzw. Erhaltungsgesetz der Ideen, deutlich entgegen, indem auch die modernen Naturwissenschaften auf dem Boden antiker Naturphilosophie ruhen. Jene mystisch-spekulative *Alchemie* abstrahiert bewußt von einer Erweiterung der Kenntnisse von den Stoffen und damit von einer Mehrung der materiellen Kulturmittel zum Zwecke einer Ausweitung des *äußeren* Wirkungsraumes der Menschen: sie konzentriert sich vielmehr auf die Vertiefung der *Innenwelt des Menschen* (nicht der Materie), auf *seine Veredlung*, auf die Herstellung einer Harmonie der Ganzheit-Einheit von Leib und Seele. Die moderne *Chemie* stellt als eine exakte Experimentalwissenschaft den polaren Gegensatz hierzu dar. So gesehen läßt sich dann die Geschichte der wissenschaftlichen Chemie als eine im Fluß befindliche Auseinandersetzung zwischen zwei antiken gegensätzlichen Weltanschauungen deuten, nämlich der idealistisch-metaphysischen des Aristoteles (die das Mittelalter beherrschte) und der mechanistisch-atomistischen (materialistischen) eines Demokrit, die der Neuzeit mit der Erforschung und *Veredlung der Stoffe* ihren Stempel aufdrückte. Die Entwicklung der Chemie ist dann bedingt durch die Amplituden des zwischen den beiden Grenzfällen schwingenden geistigen Pendels (und den „mesopolaren" Zwischenlagen), und die „Wiederkehr der Ideen" (im Sinne von Goethe) bzw. die Erhaltung derselben ist eine Denknotwendigkeit. Es erscheint daher auch verständlich, daß — sozusagen — unter dem Talar selbst der modernsten Naturwissenschaftler *stets der Chiton* der antiken Naturphilosophen hervorblickt.

Das Windfeld über den Meereswellen

Von Ulrich Roll.

(Aus der Abt. Maritime Meteorologie des Meteorologischen Amtes, Hamburg.)

Die Entwicklung der modernen Physik hat uns Kenntnisse von atomaren Zusammenhängen vermittelt, die wir mit unseren Sinnen ohne besondere Hilfsmittel nicht wahrnehmen können. Dadurch hat sich der fast paradoxe Zustand ergeben, daß wir über solche gleichsam „verborgenen" Dinge oft besser unterrichtet sind als über Naturerscheinungen, deren Wirken uns täglich unmittelbar und eindrucksvoll vor Augen steht. Man braucht dabei gar nicht einmal an unser derzeitiges Unvermögen zu denken, den Ablauf der Wettererscheinungen exakt vorauszuberechnen. Auch auf naturwissenschaftlichen Teilgebieten, für die ein hinreichender mathematischer Formelapparat bereits zur Verfügung steht, wie z. B. in der Theorie der Meereswellen, ist unsere tatsächliche Kenntnis von den wirklichen Zusammenhängen noch sehr gering. Wir wissen zwar, daß der Wind die Meereswellen entstehen läßt, wir besitzen jedoch noch keine volle Klarheit über den Mechanismus dieser Energieübertragung. Es sind vier Möglichkeiten denkbar, wie die turbulente Windströmung Wasseroberflächenwellen erzeugen und unterhalten könnte, und drei von ihnen sind Grundlagen von wohlausgebildeten Theorien geworden.

Lord Kelvin (1) und v. Helmholtz (2) gingen von der Vorstellung aus, daß ein Zusammendrängen der Stromlinien des Windes über den Wellenbergen Unterdruck-, ein Auffächern in den Wellentälern jedoch Überdruckgebiete erzeugt. Die dadurch bedingten *Sog-* und *Druckkräfte* verstärken eine geringfügige Störung des Wasserspiegels so lange, bis die Druckunterschiede mit der Schwerkraft im Gleichgewicht sind. Die unter diesen Voraussetzungen sowie unter Berücksichtigung der Oberflächenspannung entwickelten Gleichungen für die Wellengrößen stehen — hinsichtlich der geforderten Mindestgeschwindigkeit von 670 cm/s für das Entstehen der langsamsten Wellen — mit der Erfahrung im Widerspruch, denn diese Wellen treten bereits bei wesentlich geringeren Windgeschwindigkeiten auf. Auch ist die Existenz eines solchen Schwellenwertes der Windgeschwindigkeit umstritten.

Später hat Jeffreys (3) den Winddruck auf den Wellenluvhang als maßgebend für die Wellenentstehung angesehen. Er setzt die vom *Winddruck* an der Welle geleistete Arbeit gleich der durch Reibung bei der Wellenbewegung im Wasser verzehrten Energie und gewinnt Ausdrücke für die Wellengrößen, in denen jedoch noch eine unbekannte Konstante steckt, so daß eine Nachprüfung der Theorie einstweilen nicht möglich ist.

Jeffreys hat ferner untersucht, ob die *tangentiale Schubkraft* des Windes an der Wasseroberfläche — die ja ähnlich wie bei einer Saite zu Schwingungen Anlaß geben kann — für die Erklärung der Meereswellen ausreicht. Er erhält jedoch Ergebnisse (Mindestgeschwindigkeit 480 cm/s), die mit der Erfahrung nicht übereinstimmen.

Schließlich hat Seilkopf (4) — mehr qualitativ — Anschauungen über das Aufkommen von Seegang entwickelt und dabei die Ansicht vertreten, daß hierfür vor allem die Vertikalbewegungen innerhalb der Luft maßgebend seien. Nach Seilkopf wird die Wellenbewegung durch Turbulenzkörper der Luft entfacht und laufend beeinflußt, die unter geringem, jedoch merklichem Einfallswinkel „auf die Wasseroberfläche auftreffen und gleichsam aufsplittern". Als Beweis für seine Anschauungen führt Seilkopf die bekannten Seegangsunterschiede in Kalt- und Warmluft an. Während in der turbulenten Kaltluft Luftpakete aus größerer Höhe direkt auf die Wasseroberfläche herabschießen und rasch einen steilen Seegang aufwerfen, entsteht der flachere und regelmäßigere Seegang in der Warmluft durch Aufrollung und Verwirbelung einer flachen Kaltlufthaut unmittelbar über der Wasseroberfläche.

Die angedeuteten Theorien haben entsprechend ihrem verschiedenartigen physikalischen Gehalt eigentlich nur die Tatsache gemeinsam, daß sie den spärlichen Messungen nicht gerecht werden, falls überhaupt ihre Nachprüfung möglich ist. Vielleicht darf das Problem der Meereswellen nicht unter einem notwendigerweise einseitigen Gesichtswinkel Sog *oder* Winddruck *oder* Reibung *oder* Turbulenz behandelt werden, bevor geklärt ist, in welchem Umfange die vier genannten — sicher wirksamen — Ursachen jede in ihrer Weise zu der Entstehung und Weiterentwicklung der Meereswellen beitragen. Nach Lage der Dinge kann ein Fortschritt auf diesem Gebiet nur von *neuen umfassenden Messungen* erwartet werden, nachdem die Theorie der Empirie weit vorausgeeilt ist.

Da die Entstehung und die Fortpflanzung der Meereswellen ein typisches Grenzproblem zwischen Ozeanographie und Meteorologie darstellen, kann von zwei Seiten an diese Frage herangetreten werden. Während die Ozeanographie sich bemüht, Messungen über die Gestalt und Bewegung der Meereswellen sowie der in ihnen tätigen Kräfte zu gewinnen, ist man von meteorologischer Seite her bestrebt, das *Windfeld* über den Wellen zu studieren. Die zweite Betrachtungsweise vermag dabei sehr wesentlich zum Verständnis und zur Lösung des Problems beizutragen, denn die Veränderungen der Luftströmung über einer gewellten Wasseroberfläche — insbesondere die dabei auftretenden Reibungsverluste — werden im Zusammenhang mit gleichzeitigen Wellenmessungen am ehesten darüber Auskunft geben können, in welcher Weise der Wind auf die Meeresoberfläche wirkt. Da die Meereswellen wandern und überdies in ihrer Gestalt sehr unregelmäßig sind, ist es bis jetzt noch nicht gelungen, das Stromlinienbild über einer solchen Welle exakt festzulegen. Man muß sich zunächst damit begnügen, mit Schalenkreuzanemometern mittlere Windmessungen in verschiedenen Höhen über der Wasseroberfläche gleichzeitig vorzunehmen. Auch solche Messungen sind über dem Meere verhältnismäßig schwierig, woraus sich ihre Spärlichkeit erklärt. Über tiefem Wasser können Windmessungen nur von Schwimmkörpern aus vorgenommen werden, die entsprechend dem Verhältnis ihrer Abmessungen zur Wellenlänge selbst mehr oder weniger an der Wellenbewegung teilnehmen. Daraus ergeben sich zwangsläufig Schwankungen der Windmesser und Ungenauigkeiten in den Meßhöhen, die in ihrem Betrag nicht genau bekannt und daher kaum zu eliminieren sind.

Angesichts dieser meßtechnischen Schwierigkeiten auf See gewinnen die Untersuchungen an festen Wellenmodellen erhöhte Bedeutung, die Motzfeld (5) im Windkanal anstellte, um die Strömung über solchen welligen Wänden zu studieren. Allerdings muß dabei im Auge behalten werden, daß die Versuchsbedingungen in wesentlichen Punkten (Wanderung der Wellen, Nachgiebigkeit der Wasseroberfläche, Orbitalbewegung der Wasserteilchen) von den Verhältnissen bei den Meereswellen abweichen. Es kann daher nicht von vornherein erwartet werden, daß Motzfelds an festen Wellenmodellen erhaltenen Ergebnisse auch auf dem Meere zutreffen.

Bevor wir die Untersuchungen Motzfelds skizzieren, seien einige wichtige Grundbegriffe der Turbulenztheorie kurz erläutert, die im folgenden immer wieder auftreten werden. Bei Betrachtung der Strömungen an einer Wand pflegen wir die turbulenzbedingten inneren Bindungen zwischen den benachbarten Stromfäden als Wirkungen einer tangentialen Schubkraft oder einer tangentialen *Schubspannung* τ (Kraft/Flächeneinheit) aufzufassen. In der bodennahen Luftschicht kann diese Schubspannung mit guter Annäherung als höhenkonstant angesehen und somit der unmittelbar am Boden bzw. an der Wasseroberfläche angreifenden Schubspannung τ_0 gleichgesetzt werden. Noch häufiger als τ_0 tritt in den theoretischen Darstellungen turbulenter Strömungen folgende Kombination der Schubspannung τ_0 und der Luftdichte ϱ auf: $\sqrt{\tau_0/\varrho}$. Da diese Größe im wesentlichen durch die Schubspannung bestimmt wird und überdies die Dimension einer Geschwindigkeit besitzt, wird sie als *Schubspannungsgeschwindigkeit* u^* bezeichnet. Sie ist von der Größenordnung der turbulenten Schwankungen. Die formelmäßige Beschreibung der Turbulenzvorgänge hat ferner Prandtl durch die Einführung des Begriffes *Mischungsweg* außerordentlich befruchtet. In Analogie zu der freien Weglänge der Moleküle in der kinetischen Theorie wird hier unter dem Mischungsweg diejenige Wegstrecke eines Luftteilchens verstanden, die es isoliert — unter Beibehaltung seiner Temperatur, seines Impulses usw. — zurücklegt, bevor es sich wieder mit seiner Umgebung vermischt. Dieser Mischungsweg nimmt innerhalb der bodennahen Luftschicht linear mit der Höhe zu. Unmittelbar am *glatten* Boden ist er gleich Null. Handelt es sich jedoch um *rauhe* Oberflächen, so wird der Mischungsweg an der Wand, d. h. an den Gipfeln der Wandrauhigkeiten nicht verschwinden, sondern durch die Abmessungen der Höcker bzw. der Höhlungen bestimmt werden. Formelmäßig läßt sich somit dieser Minimalbetrag des Mischungsweges unmittelbar an einer rauhen Wand durch eine Größe z_0 ausdrücken, die wir *Rauhigkeit* nennen wollen und die in einfacher Weise von den Dimensionen der Unebenheiten abhängt. Diese anschauliche Bedeutung der Rauhigkeitsgröße z_0 wird jedoch bei der Betrachtung der vertikalen Windgeschwindigkeitsprofile — in der z_0 eine wichtige Rolle spielt — einer mehr formalen weichen müssen. Nach Prandtl (6)

kann nämlich das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil in der bodennahen Luftschicht (gekennzeichnet durch höhenkonstante Schubspannung und lineare Mischungswegzunahme) mit befriedigender Genauigkeit durch eine logarithmische Formel wiedergegeben werden:

$$u = \frac{u^*}{\varkappa} \ln \frac{z+z_0}{z_0} = 5{,}75\, u^* \log \frac{z+z_0}{z_0}. \qquad (1)$$

Hierin bedeuten: u die Windgeschwindigkeit, z die Höhe über dem Boden, $u^* = \sqrt{\tau_0/\varrho}$ die Schubspannungsgeschwindigkeit, τ_0 die Schubspannung, ϱ die Dichte, $\varkappa = 0{,}4$ die universelle Turbulenzkonstante, z_0 die Rauhigkeitshöhe (cm), *ln* den natürlichen und *log* den dekadischen Logarithmus.

Über *rauhen* Wänden ist die Größe z_0 unmittelbar mit den Abmessungen der Unebenheiten verbunden. So gibt Prandtl für Sandrauhigkeit $z_0 = k/30$, wenn k den mittleren Durchmesser der aufgeklebten Sandkörner bedeutet.

Für die Strömung über *glatten* Wänden wird der Übergang zwischen der glatten Wand und dem turbulenzerfüllten Luftstrom durch eine *laminare Grenzschicht* von der Dicke ≈ 1 mm vermittelt und es gilt nach v. Kármán (7) eine etwas abgeänderte Form des logarithmischen Windgeschwindigkeitsgesetzes, die sich jedoch in (*1*) überführen läßt, wenn wir auch hier — rein formal — eine Rauhigkeitszahl z_0 definieren, deren charakteristisches Kennzeichen die umgekehrte Proportionalität zur Schubspannungsgeschwindigkeit u^* ist ($z_0 \approx 1/u^*$). Diese Rauhigkeitswerte sind naturgemäß um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als die über rauhen Wänden üblichen.

Motzfeld hat nun die Strömung über verschiedenen Wellenformen (Sinus, Trochoide, Wellen mit scharfen Kämmen) im Windkanal untersucht und kommt dabei zu folgenden Ergebnissen:

Über Wellenprofilen mit *scharfen Kämmen* reißt die Strömung an den Kämmen ab, es bilden sich Leewirbel. Die mittlere vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung läßt sich durch die Gleichung

$$u = 5{,}75\, u^* \log (7{,}25\, z/h)\,; \quad z_0 = h/7{,}25 \qquad (2)$$

darstellen. Der Rauhigkeitsparameter z_0 ist der Wellenhöhe h proportional. Wir beobachten somit einen ähnlichen Zusammenhang wie über rauhen Wänden.

Bei Wellenprofilen mit *runden Kämmen* (Sinus, Trochoide) fand Motzfeld keine Ablösung der Strömung, vielmehr ergab sich eine mittlere Windgeschwindigkeitsverteilung, die der über glatten Flächen (v. Kármán) ähnlich ist.

$$u = 5{,}75\, u^* \log (z/z_0)\,, \text{ mit } z_0 = \frac{\nu}{3u^*}\, 10^{3{,}17 \frac{\operatorname{tg} \alpha_m}{u^*}}. \qquad (3)$$

Hierin ist ν die kin. Zähigkeit der Luft und $\operatorname{tg} \alpha_m$ die maximale Steigung der Tangente an das Wellenprofil. Da die Variation der Zehnerpotenz gering bleibt, ist die Rauhigkeit z_0 im wesentlichen der Schubspannungsgeschwindigkeit u^* umgekehrt proportional, wobei der Faktor von der Wellenform ($\operatorname{tg} \alpha_m$) abhängt. Allerdings ist dieser Einfluß der Wellenform verhältnismäßig gering.

Dieses Ergebnis läßt die Folgerung zu, daß bei Wellenformen mit runden Kämmen der (durch tangentiale Scherkräfte verursachte) Reibungsanteil des Strömungswiderstandes den Druckanteil übertrifft. Dieser Schluß wird gestützt durch die von Motzfeld bestimmten Beiwerte des Druck- und Reibungswiderstandes c_d und c_r. Während bei Wellenprofilen mit scharfen Kämmen der Beiwert c_d des Druckwiderstandes etwa 87—88% des Gesamtwiderstandsbeiwertes ausmacht, sinkt bei Wellenprofilen mit runden Kämmen der Druck- gegenüber dem Reibungsanteil erheblich ab. So beträgt bei Sinus- bzw. Trochoidenprofilen mit einem Verhältnis Wellenhöhe/Wellenlänge = 0,1 — also bei steilen Profilen — der Beiwert c_d des Druckwiderstandes nur noch 39—44% des Gesamtwertes, um schließlich bei einem den Meereswellen hinsichtlich der Steilheit entsprechenden Profil (Wellenhöhe/Wellenlänge = 0.05) auf 18% zurückzugehen. Aus den Modellversuchen von Motzfeld scheint also hervorzugehen, daß bei Wellen mit scharfen Kämmen der Druckwiderstand, bei runden Wellenprofilen jedoch der Reibungswiderstand die maßgebende Rolle spielt.

Es gilt nun festzustellen, ob und inwieweit die von Motzfeld auf Grund von Modellversuchen gewonnenen Erkenntnisse auch für die Luftströmung über den wandernden Meereswellen zutreffen. Ein geeignetes Beobachtungsmaterial existierte bis jetzt nicht. Bei den bisher veröffentlichten Windgeschwindigkeitsmessungen in den untersten Metern über der Wasseroberfläche von Wüst (8), Montgomery (9), Shoulejkin (10) und Bruch (11) sowie bei den Windgradientmessungen während der Internationalen Golfstromuntersuchung 1938 auf „Altair" fehlen gleichzeitige Wellenmessungen, so daß sich die von Motzfeld an Wellenmodellen gefundenen Beziehungen damit nicht exakt nachprüfen lassen. So erklärt es sich, daß Rossby (9) eine Tendenz zur Abnahme der „Rauhigkeit" der Meeresoberfläche mit wachsender Windstärke fand, Sverdrup (12) jedoch eine Zunahme postulierte, während Model (13) aus den Bruchschen Messungen eine Konstanz herleitete, wobei diese, etwas paradox klingenden Formulierungen dadurch zustandekommen, daß unter „Rauhigkeit" immer der Parameter z_0 verstanden wird.

Um diese Lücke zu schließen, hat der Verfasser — im Rahmen der Arbeiten der Maritimen Abteilung des Meteorologischen Amtes für Nordwestdeutschland, Hamburg — u. a. Messungen der Windgeschwindigkeit in der wassernahen Luftschicht, verbunden mit gleichzeitigen Wellenmessungen, durchgeführt. Aus zeitbedingten Gründen und aus der Kenntnis der besonderen Schwierigkeiten heraus, die solchen Messungen über tiefem Wasser anhaften, wurden die Untersuchungen über flachem Wasser vorgenommen. Es bestand somit die Möglichkeit, die Meßgeräte an einem fest auf dem Meeresboden stehenden Mast anzubringen. Der Meßort lag im Wattenmeer nordwestlich der Insel Neuwerk. Meßzeit: Juli — Oktober 1947.

Die Vorteile dieser Meßstelle bestanden neben der erwähnten Möglichkeit der Mastaufstellung in der über einem großen Bereich konstanten Wassertiefe von 175 bis 200 cm bei Hochwasser, sowie in der verhältnismäßig großen Regelmäßigkeit und daher guten Meßbarkeit der Wellen. Als Nachteile mußten ein erheblicher Gezeitenstrom und — damit verbunden — eine starke zeitliche Änderung der Wassertiefe in Kauf genommen werden.

Die mittlere Windgeschwindigkeit wurde in 6 verschiedenen Höhen zwischen 4 und 200 cm über den Wellenkämmen mit Schalenkreuzanemometern gleichzeitig gemessen. Im gleichen Zeitabschnitt erfolgte die Messung der Wellengrößen: Wellenrichtung, Wellenhöhe h, -Periode T und -Geschwindigkeit c (daraus ergab sich die Wellenlänge λ gemäß $\lambda = cT$) sowie der Wassertiefe und des Gezeitenstromes nach Richtung und Geschwindigkeit. Außerdem wurden die Temperatur- und Feuchtigkeits-

verhältnisse in dieser Schicht unter laufender Kontrolle gehalten. Einzelheiten über die Messungen sind an anderer Stelle veröffentlicht (14). Das Ergebnis dieser Untersuchungen während des Jahres 1947 (sie werden im Jahre 1948 fortgesetzt) umfaßt 193 Windgeschwindigkeitsserien (gleichzeitige Windmessungen in 6 verschiedenen Höhen) mit Wellen- und Strommessungen, und 73 Windgeschwindigkeitsserien über dem trockenen Wattboden

Hinzu treten u. a. Sondermessungen, wie z. B. Windprofile von 2 bis 24 cm über den Mikrowellen kleiner flacher Tümpel, die bei Niedrigwasser auf dem sonst trockenen Wattboden zurückbleiben, oder räumliche Profilschnitte zur Untersuchung der Windprofiländerung beim Wechsel der Unterlage (Land — See, Land —Watt).

Vor der Bearbeitung wurde der Einfluß des Gezeitenstromes ausgeschaltet, d. h. sämtliche Geschwindigkeitsmessungen wurden auf ein wasserfestes Koordinatensystem bezogen. Die einzelnen stromkorrigierten Windserien wurden sodann — um den Einfluß der Streuung herabzusetzen — zu mittleren Windprofilen zusammengefaßt. Diese entsprachen ausnahmslos der logarithmischen Formel. Daraus wurden die zugehörigen Werte für die Rauhigkeit z_0 und die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Als Ordnungsprinzip für die Zusammenfassung der Einzelserien zu Mittelwerten wurde zunächst die Wellenhöhe verwendet, denn es galt festzustellen, ob die von Motzfeld für scharfkämmige Wellen gefundene Proportionalität zwischen Rauhigkeit und Wellenhöhe auch im Bereich der wandernden Meereswellen gültig ist. Da bei unseren Messungen die Wassertiefe zwischen 1 und 175 cm variierte, überdeckten dementsprechend die Wellenhöhenmessungen den verhältnismäßig weiten Bereich von 0,1 bis 30 cm. Hierbei war es notwendig, die bisher auf die Wellenkämme bezogenen Höhen der Windmesser zu korrigieren und sie jeweils durch Addition der halben mittleren Wellenhöhe auf ein mittleres Niveau zu reduzieren. Die Bestimmung der Rauhigkeitsparameter für die verschiedenen Wellenhöhenbereiche ließ *keinen* Zusammenhang zwischen *Rauhigkeit* und *Wellenhöhe* erkennen. Die von Motzfeld an Modellwellenprofilen mit scharfen Kämmen gefundene Beziehung (*2*) scheint also — zumindest für Flachwasserwellen — nicht zuzutreffen.

Es lag nunmehr nahe, zu untersuchen, ob die von Motzfeld für Wellen mit runden Kämmen aus Modellversuchen abgeleitete Windgeschwindigkeitsverteilung (*3*) über dem Meere anwendbar ist. Hierzu wären die einzelnen Windprofile nach Schubspannungsgeschwindigkeiten u^* (d. h. praktisch nach Windgeschwindigkeiten) und innerhalb derselben nach Wellenformen (tg a_m) zu ordnen. Der exakte Wert der maximalen Steigung des Wellenprofiles läßt sich nur ableiten, wenn die genaue Wellengestalt bekannt ist. Dieses ist jedoch nicht der Fall. In Ermangelung einer geeigneteren gemessenen Größe soll die Steilheit der Wellen, d. h. das Verhältnis Wellenhöhe/Wellenlänge h/λ als vorläufiges Maß für die maximale Steigung des Wellenprofiles dienen. Im Falle von Sinuswellen gilt tg $a_m = \pi h/\lambda$. Auch hierbei wurden die Meßhöhen entsprechend der mittleren Wellenhöhe korrigiert.

Das Ergebnis dieser Zusammenfassung war eine deutliche Abhängigkeit der Rauhigkeit von der Schubspannungsgeschwindigkeit in dem von der Gleichung (*3*) geforderten Sinne. Ein Einfluß der Steilheit der Wellen ließ sich jedoch nicht feststellen, bzw. wurde durch die Streuung überdeckt.

Um die Mittelwerte möglichst zahlreich zu belegen, wurde nunmehr auf die Aufspaltung nach der Steilheit h/λ verzichtet und nur eine Ordnung nach Windgeschwindigkeiten vorgenommen. Die Anzahl der

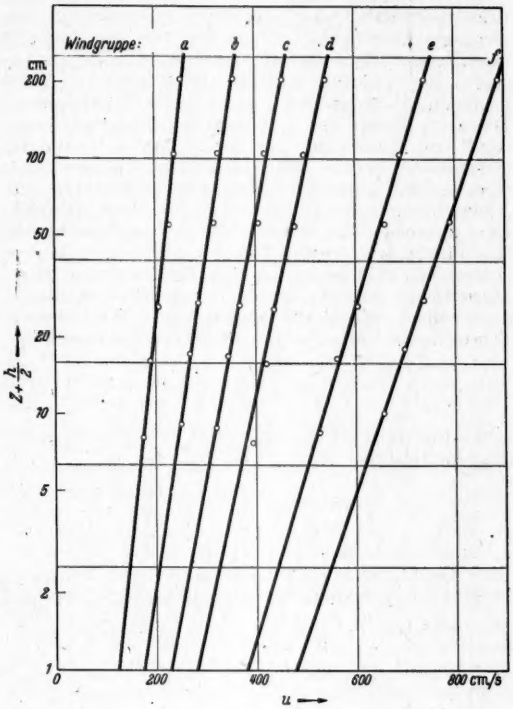


Fig. 1.

Einzelserien in den 6 verschiedenen Windgruppen lag im Mittel zwischen 20 und 25. Die auf diese Weise erhaltenen mittleren Windprofile sind in der Fig. 1 dargestellt, in der für die Höhen $z + h/2$ ein logarithmischer Maßstab gewählt wurde. Wir erkennen, daß

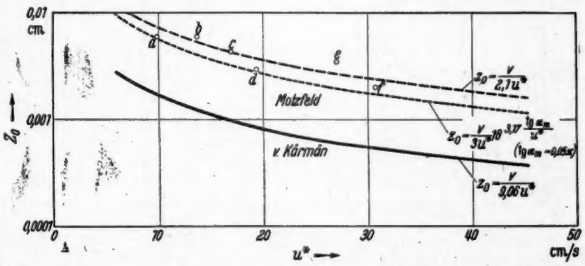


Fig. 2.

die vertikalen Windgeschwindigkeitsverteilungen sämtlich gradlinig verlaufen, das logarithmische Gesetz (*1*) also gut erfüllt ist. Fig. 2 gibt die aus diesen Profilen ermittelten Rauhigkeitszahlen z_0 (ebenfalls logarithmisch aufgetragen) in Abhängigkeit von den zugehörigen Werten der Schubspannungsgeschwindigkeit u^*. Diese Darstellung enthält ferner:

1. die Rauhigkeitswerte z_0 in Abhängigkeit von u^*; die sich gemäß der v. Kármánschen Formel für eine Strömung über einer glatten Fläche ergeben würden,
2. die Rauhigkeitswerte z_0 in Abhängigkeit von u^*, die gemäß der Gleichung (*3*) von Motzfeld für eine Strömung über Wellen mit runden Kämmen gelten

würden. Hierbei wurde für die Wellen ein Sinusprofil ($\operatorname{tg} \alpha_m = \pi h/\lambda$) mit einer den mittleren Verhältnissen auf dem Meere entsprechenden Steilheit ($h/\lambda = 0.05$) zugrunde gelegt.

Die Messungen zeigen, daß die Rauhigkeitszahlen der Meeresoberfläche mit wachsender Schubspannungsgeschwindigkeit (d. h. Windgeschwindigkeit) eine *geringe Abnahme* aufweisen und parallel zu der Kurve v. Kármáns für glatte Flächen — nach größeren Rauhigkeiten verschoben — verlaufen. Die Zahlenwerte für z_0 liegen zwischen 0,006 und 0,002 cm. Die aus der Beziehung (*3*) von Motzfeld errechneten Werte kommen den gemessenen bemerkenswert nahe. Die Unterschiede könnten auf Abweichungen der Wellen von der einfachen Sinusform zurückgeführt werden, die für die Berechnung zugrunde gelegt wurde. Die Schwankungen in den gemessenen Rauhigkeitszahlen stellen vermutlich Streueffekte dar, sie sind nicht durch Änderungen der Steilheit erzeugt. Die gemessenen z_0-Werte lassen sich in ihrem Verlauf annähern durch die Beziehung

$$z_0 = \frac{\nu}{2{,}1\, u^*},$$

womit die vertikale Windzunahme über dem Wattenmeer die Gestalt erhält:

$$u = 5{,}75\, u^* \log \frac{2{,}1\, u^*}{\nu}\left(z + \frac{h}{2}\right) \qquad (4)$$

Für eine feste Meßhöhe, z. B. $z + h/2 = 200$, ergibt diese Gleichung (*4*) einen Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit u_{200} in dieser Höhe und der

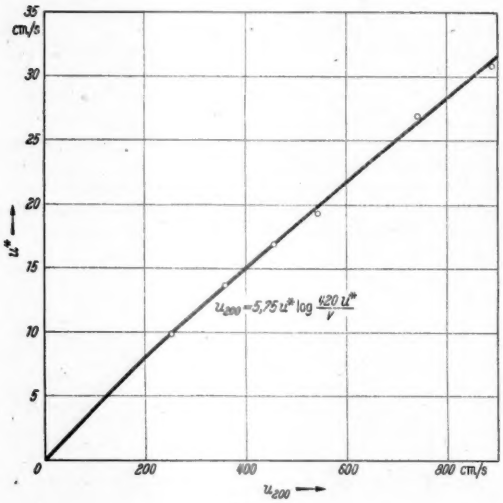


Fig. 3.

Schubspannungsgeschwindigkeit u^* (Fig. 3). Aus dieser Darstellung wird deutlich, daß die Schubspannungsgeschwindigkeit sich praktisch linear mit der Windgeschwindigkeit ändert. Wir sind nunmehr in der Lage, aus einer einzigen Windgeschwindigkeitsmessung z. B. in 200 cm Höhe mit Hilfe der Fig. 3 die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* zu bestimmen und damit gemäß (*4*) das gesamte vertikale Windprofil zu berechnen.

Die Windprofilmessungen über den Wellen flacher Tümpel bei Niedrigwasser führen auf Rauhigkeitszahlen von der gleichen Größenordnung wie über dem Wattenmeer, vorausgesetzt daß eine Anlaufzeit von etwa 2 bis 3 sec nach dem Wechsel der Unterlage verstrichen ist.

Aus den Messungen über dem Wattenmeer läßt sich — zusammenfassend — folgendes aussagen:

Das Windprofil über dem Wattenmeer wird mindestens bis 2 m Höhe nicht durch die Wellenhöhe beeinflußt. Die Meeresoberfläche besitzt also keine (konstante) „Rauhigkeit' im eigentlichen Sinn. Vielmehr läßt sich das mittlere Windfeld über den Meereswellen befriedigend durch Gleichungen darstellen, die der v. Kármánschen Formel für die Strömung über glatten Flächen ähneln und die durch die umgekehrte Proportionalität zwischen der — hier rein formal definierten — Rauhigkeit z_0 und der Schubspannungsgeschwindigkeit u^* charakterisiert sind. Die sogenannte „Rauhigkeit" der Meeresoberfläche nimmt also mit wachsender Schubspannungsgeschwindigkeit (d. h. mit zunehmender Windstärke) — unabhängig von der Wellenhöhe — ab. Ob der von Motzfeld an Modellversuchen gefundene — übrigens geringe — Einfluß der Wellengestalt ($\operatorname{tg} \alpha_m$) in Wirklichkeit besteht, muß dahingestellt bleiben. Er konnte in unseren Messungen — möglicherweise durch die Streuung überdeckt — nicht festgestellt werden.

Kehren wir nun an den Ausgangspunkt unserer Betrachtungen — der Frage nach der Energieübertragung Wind — Meereswellen — zurück, so muß aus unseren Messungen geschlossen werden, daß entsprechend den Modellversuchen von Motzfeld der Druckwiderstand der Meereswellen gegenüber dem Reibungswiderstand eine geringe Rolle spielt. Die Theorie der Meereswellen wird also weniger den Winddruck als die tangentiale Reibungskraft als maßgebenden Faktor einzusetzen haben. Es hat den Anschein, als ob vor allem bei der Entstehung der Initialwellen von etwa 2 cm Wellenlänge die Reibung neben der Oberflächenspannung den Ausschlag gibt, während bei der anschließenden Umbildung und Weiterentwicklung der Wellen die Sog- und Druckwirkungen des Windfeldes nach Helmholtz und Kelvin zum Tragen kommen. Die auf die Klärung dieser Frage abzielenden Untersuchungen sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Eingegangen am 20. April 1948.

Literatur.

(1) Thomson, W., Phil. Mag (4) XLI (1871). — (2) Helmholtz, H. v., Sitz. Ber. K. Ak. Wiss. Berlin. 761—780 (1889); Sitz. Ber. K. Ak. Wiss. Berlin. 853—872 (1890). — (3) Jeffreys, H., Proc. Roy. Soc. London A. **107**, 189—206 (1925); **110**, 241—247 (1926). — (4) Seilkopf, H., Wind, Wetter u. Wellen auf dem Weltmeere. 90. Berlin (1940). — (5) Motzfeld, H., ZAMM. **17**, 193 (1937). — (6) Prandtl, L., Beitr. Ph. fr. Atm. **19** (1932). — (7) Kármán v., Journ. Inst. Aeronaut. Sc. Vol. 1. — (8) Wüst, G., Veröff. Inst. f. Meereskunde. Berlin N. F. A 6 (1920). — (9) Rossby, C. G. and Montgomery, R. B., Mass. Pap. Phys. Ocean, Met. **4**. Nr. 3 (1936). — (10) Shoulejkin, W., Gerl. Beitr. Geophys. **20**, 99 (1928). — (11) Bruch, H., Veröff. Inst. f. Meereskunde. Berlin N. F. A **38** (1940). — (12) Sverdrup, H. U., Ann. d. Hydrographie. **64**, 41 (1936). — (13) Model, F., Gerl. Beitr. **59**, 102 (1943). — (14) Roll, H. U., Ann. d. Met. 1, 139 (1948).

Hundert Jahre „Homoiothermie".

Von J. Aschoff, Würzburg.

Die Entwicklung der Homoiothermie gehört zu den entscheidenden Schritten auf dem Wege von niederen zu hochorganisierten Lebewesen. Von den vielfältig günstigen Selektionswerten einer gleichbleibend hohen Körpertemperatur sei lediglich auf die Tatsache weitgehender Unabhängigkeit von klimatischen Einflüssen und auf die stetige hohe Reaktionsbereitschaft derartiger Organismen verwiesen. Die Höhe der Körpertemperatur ist hierbei nicht das Entscheidende, sondern das Vermögen des Körpers, diese Temperatur auch unter wechselnden äußeren (und zum Teil inneren) Bedingungen beizubehalten. Der ursprünglichen Bezeichnung „Warmblüter" hafteten somit gewisse Mängel an, zumal nachdem festgestellt war, daß die Körperwärme einzelner „Kaltblüter" die Durchschnittstemperatur der „Warmblüter" unter entsprechenden Bedingungen beträchtlich übertreffen kann. So mögen in heißen Quellen Ceylons Fische, im Wüstensand Eidechsen bis zu 45° und 50° warm werden. Aus diesen Überlegungen heraus schrieb der Göttinger Privatdozent Karl Georg Lucas Christian Bergmann in seiner Abhandlung „Über die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Tiere zu ihrer Größe", erschienen in den „Göttinger Beiträgen" 1847: „Hätte sich unsere Physiologie in Ländern zwischen den Wendekreisen gebildet, so würde man wohl kaum auf die Bezeichnung: kaltblütig gekommen sein." Bergmann schlug statt dessen die Begriffe „homöotherm" und „pökilotherm" vor. Mit homoiotherm sollte sowohl auf die bei verschiedenen warmblütigen Tieren gleiche Körpertemperatur wie auf deren Konstanz verwiesen werden.

Die Einführung dieser Bezeichnung allein würde es wohl kaum rechtferigen, jenes Aufsatzes zu gedenken. Es sind von Bergmann jedoch zwei weitere Gedanken entwickelt worden, deren Bedeutung erst in jüngster Zeit wieder stark erörtert wird und die zu den Grundproblemen der Homoiothermie zählen. Es sind dies einmal die Beziehungen zwischen wärmebildender Masse und wärmeabgebender Oberfläche und zum anderen die Verhältnisse in den äußeren Schichten des Körpers, die nicht mehr zur eigentlichen Kernmasse von konstanter Temperatur gerechnet werden können. Bergmann hat somit als erster neben der Einführung des kennzeichnenden Begriffes die wesentlichen Bedingungen herausgearbeitet, die die Homoiothermie beeinflussen. Er stellte der *Wärmebildung* die Wärmeökonomie gegenüber, indem er die bedeutungsvolle Möglichkeit des Körpers erkannte, seinen *Wärmebestand* ändern zu können, und brachte beide in die notwendige Verbindung mit den Umständen der *Wärmeabgabe*. Damit waren die drei wesentlichen Größen des Wärmehaushaltes umrissen.

Die Zusammenhänge zwischen Oberfläche und Umsatz, die von Rubner (1883) und später Richet (1889) in die *Oberflächenregel* gefaßt wurden, hat Bergmann in etlichen Folgerungen erörtert. Die besondere Art allerdings, in der er sie in der Folge (1852) auf die geographische Verteilung der Homoiothermen anwandte, ist heute angegriffen (Reinig 1938). Vor allem fehlte ihm das experimentelle Material, auf Grund dessen Rubner erst zu dem Satz kam: „Große und kleine Hunde zersetzen nicht deswegen verschiedene Mengen von Nahrungsstoffen, weil ihre Zellen bestimmte Verschiedenheiten der Organisation haben, sondern deshalb, weil die von der Haut ausgehenden, durch die Abkühlung bedingten Impulse die Zellen zur Tätigkeit anregen." Der Gesamtstoffwechsel soll der Oberflächenentwicklung direkt proportional sein. Seine an Hunden gewonnenen Zahlen, von Voit (1901) an verschiedenen Tieren bestätigt, stimmen mit neueren Untersuchungen einigermaßen darin überein, daß der Homoiotherme etwa 800—1000 Kalorien/m² 24 h umsetzt, im Gegensatz zu rund 50—60 Kalorien beim Poikilothermen (Giaja 1938). Einwände gegen die Oberflächenregel (Galvao 1947) sind schon insofern berechtigt, als keine genaue Proportionalität der Umsätze zur Oberfläche besteht, wohl aber zu $^3/_4$-Potenz des Körpergewichtes. Die Zahlen der meisten neueren Untersucher liegen näher der $^3/_4$-Potenz des Gewichtes als der $^2/_3$-Potenz, was der Oberflächenregel entspräche. Bei doppelt logarithmischer Auftragung des Gewichtes gegen den Umsatz ergibt sich eine experimentell gut gesicherte Gerade (Fig. 1). Die an 26 Tierarten von Ratte bis Rind unter Grundumsatzbedingungen gewonnenen Werte haben Kleiber (1947) die Ableitung folgender Formel möglich gemacht:

$$\log \text{Umsatz} = 1{,}83 + 0{,}756 \log \text{Gewicht} \pm 0{,}05 .$$

Kleiber gibt danach als Durchschnittswert des Umsatzes für den Homoiothermen 70 Kalorien/kg$^{3/4}$ 24 Stunden oder 3 Kalorien/kg$^{3/4}$ 1 Stunde an. Die Werte für den Multiplikationsfaktor des log Gewicht in obiger Gleichung schwanken etwas, je nach den

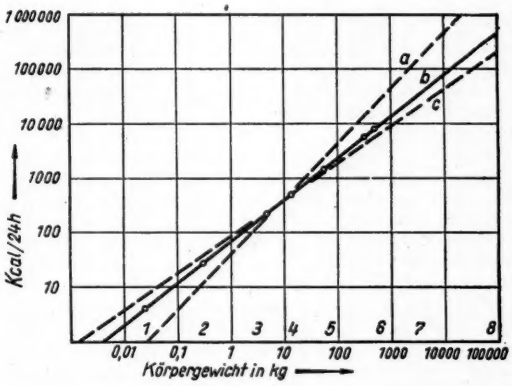


Fig. 1. Tagesumsätze in Abhängigkeit von der Körpergröße. Eingezeichnet die theoretische Proportionalität des Umsatzes zum Gewicht (a), und zur Oberfläche (c), sowie die tatsächliche Proportionalität zu Gewicht 3/4. 1 Maus, 2 Ratte, 3 Kaninchen, 4 Hund, 5 Mensch, 6 Rind (7 Elefant, 8 Wal — beide in Formel nicht eingerechnet). Aus: Kleiber, Physiol. Rev. 27, 511 (1947).

Ergebnissen verschiedener Autoren. Bei intraspezifischen Untersuchungen scheint er näher an 0,82, bei interspezifischen bei 0,75 zu liegen. Kleiber mißt diesem Unterschied keine Bedeutung bei und legt ein einheitliches Gesetz zugrunde. Wie unten noch angedeutet wird, können jedoch den beiden verschiedenen Werten auch physiologische Besonderheiten zugrunde liegen.

Die Frage nach den Ursachen dieser Gesetzmäßigkeit ist unentschieden. Mit einiger Sicherheit läßt

sich sagen, daß homoiotherme Organismen gleicher Innentemperatur bei verschiedener Körpergröße und unter gleichem Klima überhaupt nur dann denkbar sind, wenn Umsatz und relative Oberfläche, d. h. genauer die Wärmeverluste, aufeinander abgestimmt sind. Die Maus muß naturnotwendig einen 10fach höheren Umsatz je Gewichtseinheit haben als der Elefant. Aus dieser Tatsache braucht jedoch keineswegs auf einen ursächlichen Zusammenhang zwischen diesen beiden Faktoren im Sinne der Oberflächenregel geschlossen zu werden. Rubners Deutungsversuch blieb auch schon auf Grund der Abweichungen von der Proportionalität zur $^2/_3$-Potenz umstritten. Man hat geglaubt, eine chemisch verschiedene Zusammensetzung der Körper oder eine relative Verminderung metabolisch aktiven Gewebes bei größeren Tieren heranziehen zu können. Bei Durchrechnung erhält man dann jedoch nach Kleiber für das Gehirngewicht etwa der Maus das Dreifache des tatsächlichen Wertes; ähnliche Folgerungen sollen sich für Blut und andere Gewebe ergeben. Trotzdem kann die von Kestner (1934) u. a. näher untersuchte Tatsache einer relativ verschiedenen Beteiligung hoch stoffwechselnder Gewebe am Gesamtgewicht großer und kleiner Tiere nicht vernachlässigt werden. Ohne auf andere Theorien, die vorwiegend den „Ernährungsstrom" durch die inneren resorbierenden Oberflächen zum Gegenstand haben, näher einzugehen, sei hier der Punkt noch kurz erörtert, den Rubner (siehe oben) zunächst ausdrücklich abgelehnt hat: die Möglichkeit eines spezifisch verschieden großen Gewebsstoffwechsels einzelner Tiere.

Nimmt man an, daß lebende Zellen ein und derselben Gewebsart von sich aus und ohne äußere Reize nicht alle den gleichen Sauerstoffverbrauch haben, sondern daß in der Natur Protoplasma sowohl minimalen wie andererseits sehr lebhaften Stoffwechsels vorgebildet ist, so kann hierin die Ursache dafür gesehen werden, daß kleinere Tiere einen sehr viel höheren Umsatz je Gewichtseinheit haben als größere Tiere. Bergmann geht so weit, ausführlich die Frage zu erörtern, wie etwa durch den Stoffwechsel die überhaupt mögliche Körpergröße der Homoiothermen begrenzt sein könnte. Soll die Innentemperatur von 37° bis 40° nicht überschritten werden, so können aus hoch stoffwechselnden Geweben nur kleine Tiere gebildet werden, damit durch die relativ große Oberfläche der notwendige Wärmeabstrom gewährleistet ist. Je niedriger der spezifische Gewebsstoffwechsel, desto mächtiger darf die Körpergröße anwachsen, ohne daß es infolge zu kleiner Oberfläche zur Überwärmung kommt. Bergmann leitet aus derartigen Überlegungen eine untere Grenze der Homoiothermen ab, die für ihn etwa beim Kolibri erreicht ist, und bespricht die Umstände, die die obere Grenze beeinflussen. Zu ihnen zählen alle Bedingungen des Wärmeabstromes nach außen, also auch Klimatisches, der Übergang der Tiere ins Wasser (Wale) und ähnliches. Damit ist, ohne daß Bergmann es genau ausspricht, eine Umkehrung des ursprünglich gedachten Kausalzusammenhanges zwischen Oberfläche, Tiergröße und Umsatz erreicht. Diese Betrachtungsweise ist nicht notwendig absurd. Vielmehr sprechen einige Untersuchungen dafür, daß tatsächlich gleiche Gewebsarten verschiedener Tiere auch in vitro möglichenfalls sehr verschieden hohen Sauerstoffverbrauch haben. Alte Angaben, nach denen bei Herausnahme der Gewebe aus dem Organismus eine Angleichung der Umsätze an die oberen Grenzwerte stattfindet (Terroine-Roche 1925, Grafe 1925), sind durch neuere Befunde zweifelhaft geworden. Unter anderem zeigen nach Kleiber (1941) Leberstücke von Ratten, Kaninchen und Schaf einen um so geringeren Umsatz, je größer das Tier ist, von dem sie stammen. Dasselbe hatte bereits Wels (1925) gefunden, angeregt durch Rubners spätere, seine ursprüngliche Meinung etwas korrigierende Äußerung, es sei auch unter den Bedingungen, unter denen „Wärmeverluste gar nicht mehr in Frage kommen, die lebende Substanz in ihren Leistungen gleichfalls abgestuft nach der relativen Oberfläche". So gering die Zahl der vorliegenden Untersuchungen auch ist, wird man doch die Möglichkeit einer solchen angeborenen verschiedenen Stoffwechselintensität der Gewebe nicht mehr von vorneherein ablehnen können. Es sei denn, man geht von der Annahme aus, daß gewisse vom Körper erst somatisch entwickelte und gesteuerte Regulationseinrichtungen in vitro im Gewebe weiterwirken. Auch wenn sich die Theorie verschieden stoffwechselnder Gewebsarten weiterhin bestätigen sollte, ist damit die Bedeutung der Oberfläche und ihrer ursächlichen Wirkung auf den Gesamtumsatz keineswegs bestritten. Andererseits scheint es unnötig, die Invitro-Befunde deswegen abzulehnen (wie Kleiber es tut), weil sie in einem gewissen Gegensatz dazu stehen, daß ein 5 kg schweres Kaninchen etwa denselben Umsatz hat wie ein 5 kg schwerer Hund, zwei Hunde verschiedener Größe aber einen sehr ungleichen Sauerstoffverbrauch zeigen. Bei der gegenteiligen Annahme eines in vitro gleichen Umsatzes aller Gewebe ergibt sich eine kaum geringere Deutungsschwierigkeit aus der Tatsache, daß die Angleichung der im lebenden Organismus verschieden hoch stoffwechselnden Gewebe bei der Herausnahme offenbar nicht nach unten, sondern wie erwähnt nach oben stattfindet. Es ist nicht unmöglich — und könnte zu den oben genannten verschiedenen Multiplikationsfaktoren bei inter- oder intraspezifischen Umsatzvergleichen in Beziehung gesetzt werden —, daß beide Faktoren, angeborene Stoffwechselintensität des Gewebes und Oberflächenreiz, in folgender doppelter Weise zusammenwirken:

1. Das Gewebe mit seiner ihm eigenen Stoffwechselintensität erhält
2. stoffwechselsteuernde Impulse nach Maßgabe der Oberfläche.
3. Das Reaktionsvermögen des Gewebes wiederum ist spezifisch verschieden stark ausgebildet, und
4. die Oberflächenreize wirken unterschiedlich je nach Oberflächenisolation und -empfindlichkeit.
5. Hierzu tritt der unterschiedliche Gewichtsanteil hochstoffwechselnder Organe bei verschiedener Tiergröße.

Die geringe Beachtung, die der vierte der eben angeführten Punkte im allgemeinen gefunden hat, kann als Ursache für etliche der Unstimmigkeiten angesehen werden, die von Kritikern der Oberflächenregel hervorgehoben werden. Wenn schon die Wärmeverluste maßgeblich sein sollen für die Höhe des Umsatzes, so kann dessen Höhe nur dann bei allen Tieren der Oberfläche gleichmäßig proportional sein, wenn alle Homoiothermen durch die Einheit der Oberfläche wirklich gleiche Wärmemengen verlieren. Das aber ist bestimmt nicht der Fall. Noch wichtiger jedoch als die Tatsache, daß je nach Pelzdicke, Speckschicht und so fort die Wärmeverluste je m² Oberfläche unter gleichen Bedingungen sehr verschieden sein müssen, ist die sehr unterschiedlich ausgebildete Fähigkeit der Homoiothermen, zusätzlich ihre Wärmeverluste den jeweiligen Umständen anpassen zu können. Dies geschieht bei vielen hauptsächlich durch Änderung der Hautdurchblutung, die in erster Linie den Wärme-

strom vom Körperinnern durch die isolierende Oberflächenschicht an die Umwelt vermittelt. Die hierfür charakteristische Größe, die *Wärmedurchgangszahl* (kcal/m² h C°), wird dadurch gewonnen, daß man die abgegebenen Wärmemengen kalorimetrisch bestimmt und durch die Oberfläche sowie das bestehende Temperaturgefälle dividiert. Der Wärmedurchgang ist der Schichtdicke der isolierenden Hautpartien umgekehrt proportional, ihrer physikalischen Leitzahl und vor allem ihrer Durchblutung (als konvektivem Wärmetransport) direkt proportional. (Aschoff 1943). Alle die Teile des Organismus, durch die dem Temperaturgefälle entlang die Wärme nach außen abströmt und deren stark wechselnde Durchblutung in der Wärmedurchgangszahl erfaßt wird, können nicht zur eigentlichen Kernmasse konstanter Temperatur gerechnet werden. Sie sind als „Schale" des Körpers im Grunde poikilotherm (König 1944). Aus den starken Temperaturschwankungen, denen diese Schale im Zuge temperaturregulatorischer Durchblutungsänderungen unterliegen kann, errechnen sich die erheblichen Wärmebestandsänderungen des Körpers, deren Ausmaß nach Bergmanns ersten Hinweisen meist unterschätzt wurde. König (1943) hat dann erneut darauf verwiesen und errechnet, daß zur Aufheizung einer extrem ausgekühlten Schale der Umsatz eines 60 kg schweren Mannes für 2,5 Stunden in diese Schale einströmen kann, ohne nach außen in Erscheinung zu treten.

Auch diese wichtigen Zusammenhänge zwischen Kern und Schale hat Bergmann in einer ersten Arbeit (1845) bereits erkannt. Er hat dabei sowohl den Aufgaben des Kreislaufes wie der Frage nach der Ausdehnung dieser Schale seine Aufmerksamkeit geschenkt: „Der Grad aber, bis zu welchem der Haut Wärme von innen mitgeteilt werden soll, folglich auch die eine Bedingung der Wärmeverluste, steht um so mehr unter der Herrschaft physiologischer Kräfte, je mehr die Haut von der direkten, physikalischen Wärmeleitung der unterliegenden Teile abgesondert ist. Daß dies nun in so bedeutendem Maße durch die subcutane Fettschicht geschieht, ist zugleich als Beweis für die Richtigkeit unserer Ansicht wichtig. Es wird sich leicht begreifen lassen, daß jene häufige Behauptung, die Fettschicht diene als Schutz gegen die Kälte, es eigentlich schon in sich begreift, daß die Haut selbst zur Erleidung bedeutender Temperaturwechsel bestimmt sei." Bergmann entwirft das Modell einer Kugel, die durch eine wärmeisolierende Schicht von einer äußeren Kapsel getrennt ist, mit der sie durch eine wechselnde Zahl wärmeleitender Brücken verbunden werden kann. Diese wichtige Vorstellung wurde in der Zwischenzeit nur von Senator (1869) und von Fick in seiner medizinischen Physik behandelt; erst Burton (1935) griff sie wieder auf.

Daß die wechselnde Schalendurchblutung wesentlich für den Wärmehaushalt des Warmblüters mitbestimmend ist, sei kurz am Beispiel verschiedener Wärmedurchgangszahlen des Menschen erörtert. Es war lange bekannt, daß Kaltreize ausgiebige Konstriktionen der Hautgefäße bewirken können. Auch war man sich über die temperaturregulatorisch große Bedeutung des Vorganges durchaus klar, ohne jedoch mit Zahlen quantitative Angaben über seine Wirkung machen zu können. Der Ort, an dem der Kaltreiz einwirkt, ist nicht gleichgültig. Besonders empfänglich sind unter anderem die vom Trigeminus versorgten Gesichtspartien um die Nase. Rein hat als erster sowohl auf diese Tátsache verwiesen (1925), wie auch im Tierexperiment die Verlagerung des Blutes von Hautgefäßgebieten nach innen gezeigt (1931). Die mit der konstriktorischen Blutverschiebung einhergehende Verstärkung der Schalen-Schichtdicke und der verminderte konvektive Wärmetransport mußten eine beträchtliche Verringerung der Wärmedurchgangszahl erwarten lassen. So wenig jedoch alle Oberflächengebiete gleich reizempfindlich sind, so wenig sind alle Hautpartien gleichmäßig zur Vasokonstriktion befähigt. In diesem Zusammenhang hat Bergmann ausdrücklich auf die Sonderstellung der Extremitäten verwiesen: „Auch die Extremitäten stehen in solchem Verhältnis zum übrigen Körper, daß eine Wärmemitteilung, namentlich an die End-

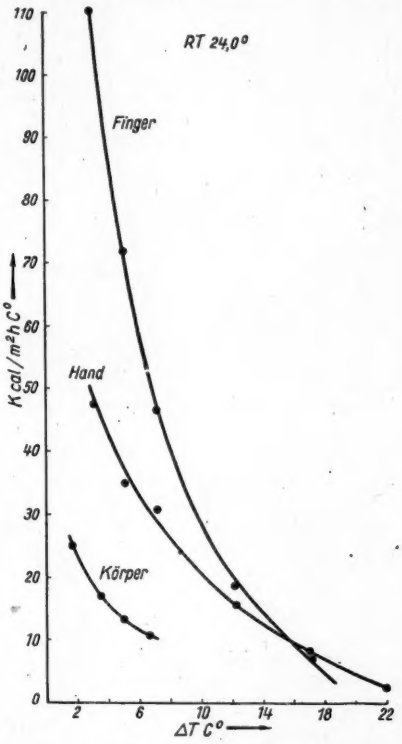


Fig. 2. Wärmedurchgangszahlen, kalorimetrisch in strömendem Wasser bestimmt, aufgetragen gegen die jeweilige Temperaturdifferenz zwischen Körperinnerm und Kalorimeter. Aus: Aschoff, Pflügers Arch. **249**, 148 (1947).

glieder derselben, sehr auf die Zirkulation des Blutes beschränkt sein muß, so daß also eine Verlangsamung des Kreislaufes in denselben ebenfalls zur Wärmeeinsparung dienen könnte." Bergmanns Annahmen sind experimentell über Erwarten bestätigt worden (Aschoff 1947). Die kalorimetrische Bestimmung von Wärmedurchgangszahlen an verschiedenen Stellen der Körperoberfläche zeigt, daß die Finger etwa 30mal, die Hand rund 15mal stärker als der Gesamtorganismus die Hautdurchblutung ändern können (Fig. 2). Wärmedurchgangszahlen, gemessen in Wasserbädern von 25° und 35°, liegen für den ganzen, bis zum Hals eingetauchten Körper bei 10 und 22 Kalorien/m² h C°, für die Hand dagegen bei 15 und 50 Kalorien/m² h C°. Das Diagramm zeigt deutlich, wie sich in warmer Umgebung die Durchblutung der Extremitäten und insbesondere ihrer gipfelnden Teile um ein vielfaches über die der Gesamtkörperfläche erhebt. Andererseits muß sich die Durchblutungseinschränkung der Extremitäten im Kalten entsprechend der Annahme Bergmanns besonders

wärmesparend auswirken. Beachtet man, daß in der Kurve für den ganzen Körper die Extremitäten enthalten sind, so ergibt sich für den Rumpf allein das Bild einer nur sehr geringfügigen Durchblutungsänderung. Mittels der aus englischen und amerikanischen Arbeiten bekannten Durchblutungszahlen menschlicher Extremitäten läßt sich in Verbindung mit den kalorimetrischen Bestimmungen abschätzen, welche Rolle dem Rumpf bei dieser Art Durchblutungsregulation im Gegensatz zu den Extremitäten zukommt (Fig. 3). Trägt man für Wassertemperaturen von 35° bis 15° die jeweilig zugehörigen Wärmedurchgangszahlen auf der Ordinate auf, so zeigt sich, daß die Hände von Werten über 60 auf ein Minimum von 2 Kalorien/m² h C° zurückgehen und diese extreme Vasokonstriktion bei tiefen Temperaturen beibehalten. Auch die Arme erreichen noch eine leidliche Einschränkung der Wärmedurchgangszahl mit fallender Außentemperatur. Die Rumpfhaut dagegen hat nur ein sehr geringes Regulationsvermögen — bei tiefen Temperaturen scheint ihre Durchblutung sogar wieder anzusteigen. Aus diesen Zahlen läßt sich die tatsächlich bei den einzelnen Temperaturen abgegebene Wärmemenge der einzelnen Teile errechnen. Die Wärmeverluste des Rumpfes steigen mit abnehmender Temperatur schnell an. Die Arme vermögen ein steileres Temperaturgefälle bis zu etwa 20° wenigstens teilweise auszugleichen. Die Hände dagegen — das steile Gefälle in tiefen Temperaturen überkompensierend — geben in 20° Wasser nur ¼ soviel Wärme ab wie in Wasser von 35°.

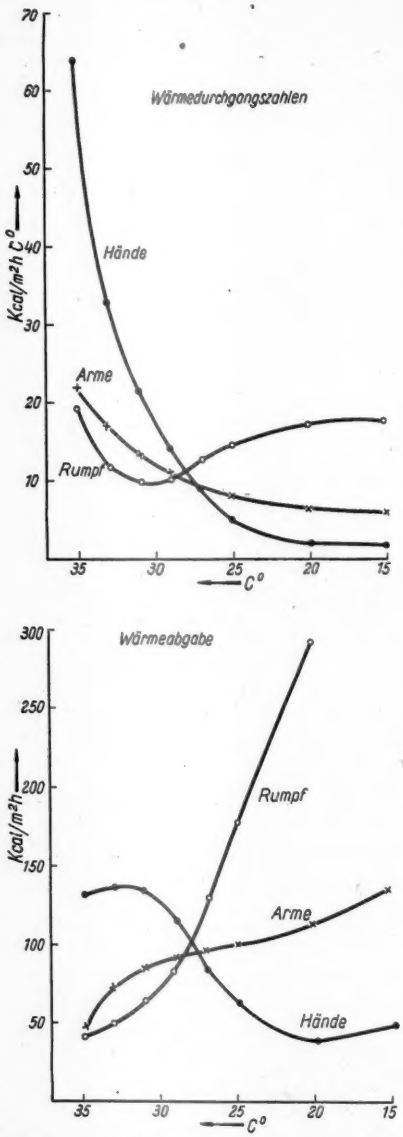


Fig. 3. a) Wärmedurchgangszahlen = relatives Durchblutungsmaß für verschiedene Wassertemperaturen. b) die tatsächlich abgegebenen Wärmemengen. (Werte für Hände gemessen, für Arm und Rumpf errechnet nach Fig. 2 und Literaturangaben.)

Diese wenigen Beispiele mögen genügen, den großen Einfluß der Schalendurchblutung auf den Wärmehaushalt zu beleuchten. Beim Menschen sind es vorzüglich die Extremitäten, die mit ihrer stark wechselnden Durchblutung den Organismus befähigen, steileren Temperaturgefällen mit Einschränkungen der Wärmeverluste zu begegnen und so auch in kalter Umgebung die Gesamtwärmeabgabe gar nicht oder nur wenig ansteigen zu lassen. Mit Hilfe dieser Einrichtung ist es dem Homoiothermen möglich, trotz wechselnder Außenbedingungen seine Innentemperatur konstant zu halten, ohne daß notwendig der Umsatz gleich geändert werden muß. Je stärker dieses Regulationsvermögen der Wärmeverluste ausgebildet ist, desto größer ist der Bereich metabolischer Neutralität, d. h. jene klimatische Temperaturspanne, in der ohne Umsatzänderungen die Kerntemperatur normal gehalten werden kann. Bei Beurteilung von Fragen der Oberflächenregel spielen diese Vorgänge keine geringe Rolle.

Bemerkenswert bleibt, wie Bergmann vor nun 100 Jahren an Hand so viel dürftigerer experimenteller Grundlagen, als sie heute zur Verfügung stehen, so scharf das Wesentliche der Homoiothermie und ihrer Bedingungen zu erfassen verstand. Ob auch seinen Schlußfolgerungen auf Herleitung der Körpergröße von Homoiothermen aus ihrem spezifischen Stoffwechsel eine gewisse Berechtigung zukommt, wird erst ganz zu entscheiden sein, wenn sicherere Ergebnisse der in vitro gemessenen Stoffwechselgrößen verschiedener Gewebe und der vergleichenden Physiologie des Wärmedurchganges vorliegen.

Eingegangen am 23. Juni 1948.

Literatur.

Aschoff, J., Pflügers Arch. **247**, 469 (1943). — —, Pflügers Arch. **249**, 148 (1947). — Bergmann, K. G. L. Chr., Arch. Anat. u. Physiol. **1845**, 300. — —, Göttinger Studien (1847). — Bergmann, K. G. L. Chr., u. Leuckart, R., Anatomisch-physiologische Übersicht des Tierreiches, Stuttgart 1852. — Burton, A. c., J. Nutrition **9**, 261 (1935). — Fick, A., Medizinische Physik, 2. Aufl., Braunschweig 1866. — Galvao, P. E., Amer. J. Physiol. **148**, 478 (1947). — Giaja, J., L'Homéothermie, Paris 1938. — Grafe, E., Reinwein H. und Singer, Biochem. Z. **165**, 102 (1925). — Kestner O., Pflügers Arch. **234**, 290 (1934). — Kleiber, M., Proc. Soc. exp. Biol. and Med. **48**, 419 (1941). — —, Physiol. Rev. **27**, 511 (1947). — König, F. H., Klin. Wschr. **1943**, 45. — —, Pflügers Arch. **247**, 497 (1944). — Rein, H., Z. Biol. **82**, 513 (1925). — —, Erg. Physiol. **32**, 28 (1931). — Reinig, W. P., Elimination und Selektion, Berlin 1938. — Richet, La chaleur animale, Paris 1889. — Rubner, M., Z. Biol. **19**, 535 (1883). — Senator, H., Arch. Path. Anat. Physiol. **45**, 351 (1869). — Terroine, E., et Roche, J., Acad. Sci. Compt. Rend. **180**, 225 (1925). — Voit, E. Z. Biol. **41**, 113 (1901). — Wels, P., Pflügers Arch. **209**, 32 (1925).

Einfache Grundvorgänge in der tierischen Entwicklung II.

Über die Entstehung von Differenzierungsmustern.

Von Karl Henke, Göttingen.

(Schluß.)

D. Rhythmische Zeichnungen.

Im Vergleich zu den bisher betrachteten singularen Binden- und Ozellenzeichnungen sind die verschiedenen Formen rhythmischer Muster experimentell bisher noch wenig untersucht. Morphologisch lassen sich unter ihnen zwei Haupttypen unterscheiden, die kurz als zentrische und nicht zentrisch gebaute Rhythmen bezeichnet werden können (23).

1. Zentrische Rhythmen.

Die zentrischen Rhythmen bestehen aus mehreren gleichartigen Linien oder Binden, die, soweit sie nicht den Rand der gemusterten Fläche erreichen, in sich zurücklaufend konzentrisch angeordnete geschlossene Figuren bilden. Sie verhalten sich hierin ebenso wie die Rand- und Grenzbildungen der Feldgliederungsmuster und erscheinen denn auch auf dem Schmetterlingsflügel durchweg *an Stelle einzelner Querbinden*. So vertritt im Zentralfeld vielfach ein derartiges rhythmisches System *Rh Zf* das Mittelschattenmuster *S* (Fig. 13a—c). Ferner tritt besonders bei Geometriden manchmal an Stelle der in dem Schema Fig. 2b eingetragenen, aus Wurzelwisch *Ww* und Außenwisch *Aw* bestehenden Symmetriewischzeichnung in jeder der beiden Umfeldgebiete basal und distal vom Zentralkern des Symmetriesystems als einfachste Musterart eine einzelne Linie oder Binde auf (Fig. 13a), die nun ihrerseits bei anderen Arten gleichfalls durch eine Gruppe von parallelen Linien ersetzt sein kann (Fig. 13c, *Rh Uf*). Die beiden Gruppen gehören sichtlich einem System an, das ebenso wie die Musterfelder der benachbarten Querbinden in der Flügelmitte zentriert ist. Ganz entsprechend kann schließlich auch innerhalb der weißen Mittelzone der Symmetriebinden entweder eine einfache, auf ihre Beziehungen zum Symmetriesystem noch nicht näher untersuchte dunkle Linie ausgebildet sein, oder jederseits eine Folge von drei derartigen Linien (6). Das Eintreten der zentrischen Rhythmen für einzelne Querbinden deutet auf die Möglichkeit, daß auch sie auf Grund eines sich im Epithel ausbreitenden Vorgangs entstehen, wie er bei der Determination eines Teils der Querbindenzeichnungen nachgewiesen ist. Ein auf diese Weise gebildetes Muster kann man als *Ausbreitungsrhythmus* bezeichnen (23).

Beim Anblick mancher zentrischen Rhythmen, etwa des Musters im Zentralfeld von *Machaerosema morlii* (Fig. 13b) glaubt man unmittelbar ein *Liesegang-Muster* vor sich zu haben, das ja stets auf einem an bestimmter Stelle einsetzenden und sich von hier ausbreitenden Vorgang beruht, sei es die Diffusion eines Stoffes, eine Zustandsänderung im Substrat oder schließlich eine chemische Reaktion. Daß einzelne Tierzeichnungen tatsächlich auf Grund eines Liesegang-Phänomens zustandekommen, hat Becker (24) zweifelsfrei dargetan an Hand des als Alterserscheinung auftretenden *Musters auf dem Abdomen der Nestmüller verschiedener Wespenarten*, das im Gefolge anhaltender mechanischer Reizung der Hypodermis entsteht. Ein ähnlich überzeugendes Beispiel aus dem Gebiet pflanzlicher Musterbildungen stellt die *Maserzeichnung in der Samenschale der Roßkastanie* dar (Fig. 14). Hier kann man an noch unvollständig ausgefärbten Stücken leicht feststellen, daß die Braunfärbung und mit ihr die Ausbildung des

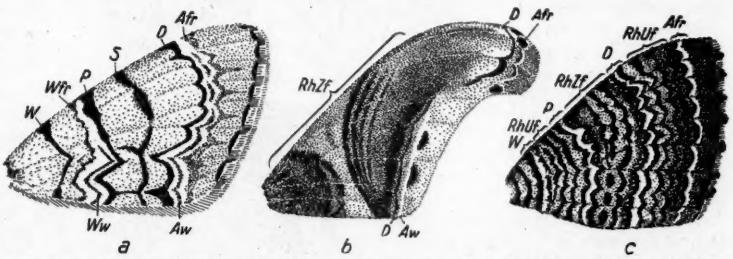


Fig. 13. *a* Einfache Linienmuster im Zentralfeld (*S*) und im Umfeld (*Aw*, *Ww*) bei *Eupithecia venosala* F. (Geom.). *b* Zentrische Rhythmen im Zentralfeld (*Rh Zf*) bei *Machaerosema mortii* Perty (Syssphing.), *c* außerdem im Umfeld (*Rh Uf*) bei *Calocalpe* (*Eucosmia*) *undulata* L. (Geom.). Übrige Bezeichnungen wie in Fig. 2.

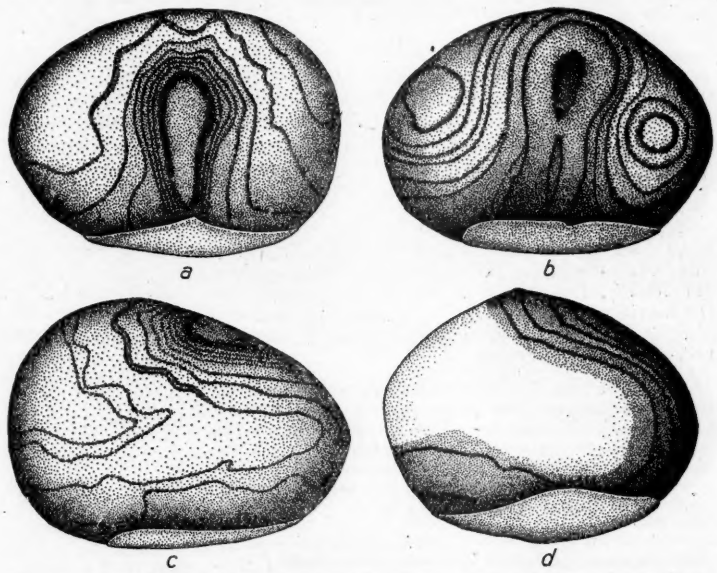


Fig. 14. Maserzeichnung in der Samenschale der Roßkastanie. Bei *d* ist die Ausfärbung vorzeitig abgebrochen.

dunklen Linienmusters von der Radicula und der Ansatzstelle der Kotyledonen aus in zentrifugaler Richtung fortschreitet. Dabei erscheinen die einzelnen dunklen Linien nacheinander jeweils hinter der Front der sich ausbreitenden Braunfärbung (Fig. 14d). Der Vorgang entspricht völlig der Entstehung eines Liesegang-Musters im Anschluß an die von einem Zentrum ausgehende Diffusion eines Stoffes in einem koloiden Medium. Da die gemusterte Fläche in sich zurückläuft, entstehen am Ende der Musterbildung nacheinander konzentrische Ringfiguren von abnehmender Größe, die in einem dem Ausbreitungszentrum gegenüberliegenden Punkt (Fig. 14c) oder auch in zwei beiderseits von ihm gelegenen Punkten zentriert sind (Fig. 14b). An der Luft schreitet die Musterbildung bei einer vorzeitig freigelegten Kastanie nicht weiter fort, sondern die noch unausgefärbten Teile der Samenschale nehmen einen gleichmäßig hellbraunen Ton an, sei es wegen der Austrocknung des Gewebes oder weil der normalerweise vorhandene enge Spaltraum zwischen Samen- und Fruchtschale für die Musterbildung unerläßlich ist.

Die Bedeutung des Liesegang-Phänomens für die Bildung der rhytmischen Schmetterlingszeichnungen ist vorläufig schwer abzuschätzen. Es braucht keineswegs in allen als Ausbreitungsrhythmen erscheinenden Fällen wirksam zu sein. Der oben S. 180 und 203 ff. geschilderte Hergang bei der Determination der Gruppe sich überlagernder Feldgliederungsmuster im Umkreis der Flügelmitte deutet auf die Möglichkeit, daß auch mehrere gleichartige, zur Ausbildung von Anreicherungsrändern führende Ausbreitungsvorgänge von abnehmender Reichweite nacheinander von demselben Zentrum ausgehen und zur Entstehung einer rhythmischen Folge gleichwertiger Linien führen können. Um zu entscheiden, welche der beiden Möglichkeiten verwirklicht ist, muß einerseits der Ort bestimmt werden, von dem die Ausbreitung ausgeht, andererseits die Reihenfolge bei der Determination der einzelnen Zonen.

Die oben S. 210 analysierte ozellenähnliche Zeichnung im Umkreis der Stigmen bei *Philosamia* zeigt, daß auch in der Schmetterlingszeichnung Bindenmuster von ausgesprochen zentrischem Bau durch Ausbreitungsvorgänge bestimmt sein können, die wie bei den gegen Ende der Musterbildung auf der Kastanie auftretenden Ringfiguren nicht vom Zentrum, sondern von der Peripherie der Figur ausgehen. Dementsprechend darf auch etwa aus dem Aufbau der konzentrischen Rhythmen im Zentralfeld der Geometriden nicht ohne weiteres auf ein im Inneren des Zentralfeldes gelegenes Ausbreitungszentrum geschlossen werden. Es ist ebensowohl möglich, daß hier die Peripherie oder die Umgebung des Zentralfeldes die Rolle des Ausbreitungszentrums bei der Musterbildung spielt. Die Reihenfolge, in der die einzelnen Zonen determiniert werden, muß bei einer Musterbildung nach dem Prinzip des Liesegang-Phänomens umgekehrt wie bei den konzentrischen Zeichnungssystemen der Flügelmitte am Ausbreitungszentrum beginnen und nach der Peripherie zu fortschreiten, wie es bei dem Muster der Roßkastanie der Fall ist, da nach der Natur des musterbildenden Mechanismus die Ausbildung einer bestimmten Zone die Grundlage dafür bildet, daß auf ihrer vom Ausbreitungszentrum abgekehrten Seite eine weitere Zone entsteht.

Wo die Ausbildung eines rhythmischen Farbmusters von einem Ausbreitungszentrum abhängig ist, erhebt sich ganz entsprechend wie bei den singularen zentrischen Querbindenmustern die Frage nach dem *primären Musterbildungsvorgang*, der zum Auftreten des Zentrums führt (s. o. S. 205 f.). Man kann vermuten, daß es sich in beiden Fällen um den gleichen Grundvorgang handelt, an den sich je nach den besonderen Umständen eine singulare oder rhythmische Musterbildung anschließt.

2. *Nicht zentrisch gebaute Rhythmen.*

Sehr viel verbreiteter als die zentrischen, sind die nicht zentrisch gebauten rhythmischen Muster. Besonders auffallende Beispiele bietet die Fellzeichnung

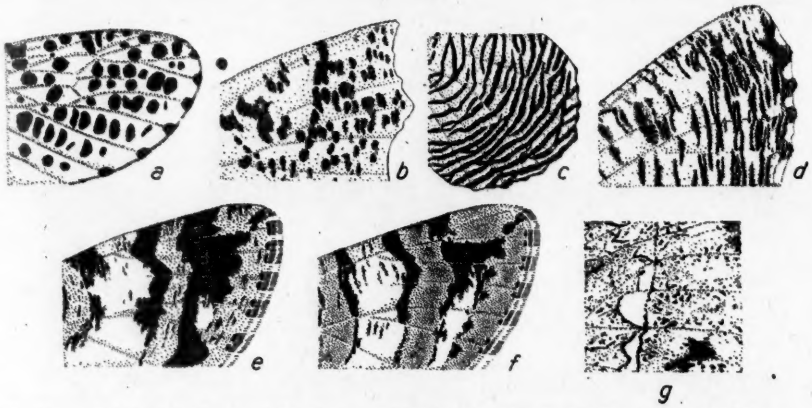


Fig. 15. *a—d* nicht zentrisch gebaute Rhythmen auf dem Schmetterlingsflügel. *a Zeuzera pyrina* L. (Coss.). *b Ennomos autunaris* Wernb. (Geom.), Tupfenmuster; *c Elymnias phegea* (Satyr.), *d Angerone prunaria* L. (Geom.), Rieselmuster. *e, f* Vikariieren von Rieselmuster und homogener Flächenverdunklung bei *Larentia sordidata* F. (Geom.). *g* Spritzzeichnung bei *Cymothoe theobene* (Nymph.). *c, g* Unterseitenansicht. *b—d, g* nach Süffert (26).

der Säugetiere, besonders der Raub- und Huftiere (25). Hier wie auf der Vogelfeder (Fig. 16b), in der Schmetterlingszeichnung und in vielen anderen Fällen sind die *Einzelelemente* typischerweise wenigstens innerhalb einer Region im allgemeinen *ungefähr von gleicher Größe.* Sie können in zwei vielfach durch Übergänge verbundenen Hauptformen, als rundliche *Tupfen* und als mehr oder weniger langgestreckte *Linien oder Riesel* auftreten (Fig. 15a—d). Der Schmetterlingsflügel kann in seiner ganzen Fläche von einem einheitlichen nicht zentrisch gebauten Rhythmus bedeckt sein, doch *hängt die Realisation des Musters auch von den Determinationsfeldern der Querbindenzeichnung ab*, da es häufig in bestimmten Musterfeldern unterdrückt oder modifiziert oder auch auf einzelne dieser Felder beschränkt ist. So erscheint bei *Philosamia* ein feines rhythmisches Muster allein im Außenfeld (Fig. 4c). Köhler und Feldotto (27) konnten das charakteristische rhythmische Muster auf der Unterseite des Flügels von *Vanessa urticae* durch Temperaturreize während einer bestimmten sensiblen Periode auch in Musterfeldern, denen es normalerweise fehlt, zur Erscheinung bringen. Manchmal treten dunkle Rhythmen von nicht zentrischem Bau, entweder in bestimmten Gebieten oder auch überall wo sie erscheinen können, *vikariierend mit einer weniger intensiven homogenen Flächenfarbe* auf (Fig. 15e, f).

Im Unterschied zu den zentrischen Mustern gibt die Form und Anordnung der Einzelelemente bei diesen Formen rhythmischer Zeichnungen keinerlei Anhaltspunkt für die Annahme, daß die Musterbildung von einem bestimmten Zentrum ausgeht und sich in

der Zeit fortschreitend ausbreitet. Jedenfalls scheint es, daß die Musterbildung sich nicht ihrer Natur nach notwendig so verhalten muß, wie es bei der Entstehung eines Liesegang-Musters der Fall ist, sondern daß sie wenigstens grundsätzlich in allen Teilen der gemusterten Fläche gleichzeitig einsetzen kann. Die Muster dieser Gruppe wurden daher als *Simultanrhythmen* bezeichnet, im Unterschied zu den ihrer Natur nach sukzessiv entstehenden Ausbreitungsrhythmen (23).

Im einzelnen umfaßt die zunächst ja nur negativ bestimmte Gruppe der nicht zentrisch gebauten Rhythmen offenbar Muster mit sehr verschiedenem *Entstehungsmechanismus*. Die Anordnung der Schuppen auf dem Schmetterlingsflügel in einem typischen Rieselmuster mit mehr oder weniger regelmäßigen, vielfach auch verzweigten Querreihen (vgl. (1) Fig. 5) läßt sich, wie früher geschildert, darauf zurückführen, daß die sämtlichen ursprünglich gleichwertigen Zellen der Flügelanlage durch *differentielle Zellteilungen* in zwei Schwesterzellen zerlegt werden, von denen die eine unter weiteren differentiellen Teilungen einen Schuppenapparat, die andere durch einfache Vermehrungsteilungen eine Gruppe gewöhnlicher Epithelzellen hervorbringt. Es ist wohl anzunehmen, daß noch manche anderen Differenzierungsmuster vom Typus der Simultanrhythmen, darunter vielleicht auch Farbmuster, nach dem gleichen Prinzip entstehen.

Die Fälle, in denen ein Simultanrhythmus eine schwächere homogene Flächenfarbe vertreten kann, legen die Vorstellung von einem ganz *anderen Mechanismus* der Musterbildung nahe, bei dem ähnlich wie bei den Anreicherungsrändern der Feldgliederungsmuster *bestimmte ursprünglich gleichmäßig verteilte Determinationsfaktoren in bestimmten Zonen angesammelt* werden. Es fragt sich dann, wodurch diese Ansammlungen innerhalb des gemusterten Bereichs und die für die typischen Simultanrhythmen so charakteristische gleichmäßige Verteilung der Musterelemente bedingt sind. Für die Annahme gesetzmäßig vorgebildeter Strukturen sind wenigstens bei den farbigen Simultanrhythmen auf dem Schmetterlingsflügel keine Anhaltspunkte vorhanden. Wo sie vorliegen, ist für sie die gleiche Frage nach der Ursache für das Auftreten und die rhythmische Anordnung der Elemente zu stellen. Bei den rhythmischen Säugerzeichnungen erscheint die von Krieg (28) entwickelte Annahme eines Zusammenhangs mit den *Spannungszuständen im Epithel* des wachsenden Embryo recht einleuchtend. Auf die rhythmischen Zeichnungen des Schmetterlingsflügels ist sie jedoch kaum anwendbar, da Anzeichen für das Bestehen bestimmter Spannungszustände fehlen. Bei manchen Schmetterlingen erscheinen nun an Stelle der gleichförmigen Simultanrhythmen Muster aus zahlreichen äußerst unregelmäßig angeordneten Flecken wechselnder Größe, durch welche die Flügelfläche ein gleichsam bespritztes Aussehen erhält (Fig. 15g). Die Determination derartiger *Spritzmuster* scheint darauf zu beruhen, daß von geringfügigen und zufällig verteilten Inhomogenitäten des Substrates Keimwirkungen für die Einleitung einer chemischen Reaktion oder auch für die Ansammlung oder Ausfällung eines zunächst gleichförmig verteilten Stoffes ausgehen, dessen Verteilung sich später im Muster abbildet. Da bei der Schmetterlingszeichnung alle Übergänge von regellosen Spritzmustern zu typischen äquidistanten Rhythmen vorkommen, besteht zwischen beiden Mustern offenbar ein Zusammenhang. *Man kann annehmen, daß auch die Bildung der typischen Simultanrhythmen mit einer regellosen Keimbildung beginnt, und daß infolge einer Konkurrenz unter den zunächst entstandenen Keimen nur die regelmäßig angeordneten bis zum Abschluß der Musterdetermination erhalten bleiben.* Trifft diese Vorstellung zu, so ist hier im Fall der Simultanrhythmen ein primärer Musterbildungsvorgang in einem zunächst ungegliederten Substrat als einfacher physikalisch-chemischer Grundvorgang verständlich.

3. *Die Frage der Musterbildung durch zeitliche Rhythmen.*

Manche Bildungen, wie Haare und Federn oder auch die Schalen der Mollusken, entwickeln sich nicht wie die bisher betrachteten Musterträger unter mehr oder weniger gleichmäßigem Flächenwachstum, sondern durch einseitigen Zuwachs von einer peripher gelegenen Wachstumszone aus. Bei den von der Basis aus vorwachsenden Anlagen der *Haare und Federn* schreitet die Ausdifferenzierung der fertigen Struktur und Pigmentierung mit der Zeit in apikobasaler Richtung fort. Wenn nun die Farbgebung etwa bei einer normalerweise ungemusterten Feder von einer bestimmten Bedingung abhängt, auf welche die jeweils in der Differenzierung begriffene oder auch eine ihr vorangehende Zone anspricht, so kann auf experimentellem Wege ganz ohne ein räumlich wirkendes Ordnungsprinzip lediglich durch eine zeitliche Veränderung jener Differenzierungsbedingung ein Farbmuster auf der Federfahne hervorgerufen werden. Nach diesem Prinzip konnten Lillie und Juhn (29) durch einmalige oder wiederholte Hormoninjektionen bei Hühnern singulare oder rhythmische Querbindenmuster auf der Feder herstellen.

Montalenti (30) prüfte daraufhin an Hand quantitativer Untersuchungen an den normalerweise

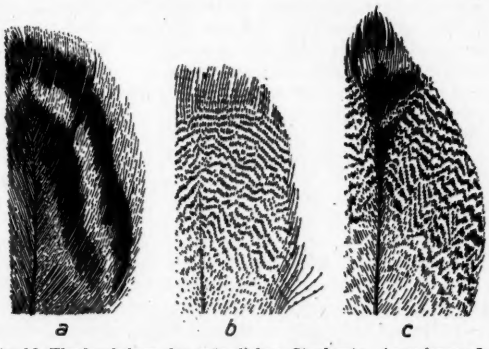


Fig. 16. Flankenfedern der männlichen Stockente, *Anas boscas* L. *a* Sommerfeder, *b* Winterfeder, *c* Umschlagfeder. Nach Henke (31).

quergestreiften Federn gewisser Hühnerrassen die *Frage, inwieweit natürliche rhythmische Muster etwa als Folge eines spontan auftretenden periodischen Wechsels einer bestimmten Bedingung für den in der Feder ablaufenden Differenzierungsvorgang erklärt werden können.* Eine Reihe von ihm erhobener Befunde ist nun tatsächlich mit einer solchen Vorstellung gut vereinbar, wenn ihnen auch keine zwingende Beweiskraft innewohnt. Ferner muß angenommen werden, daß der vorausgesetzte Rhythmus nicht im ganzen Körper einheitlich abläuft sondern seinen Sitz in dem einzelnen Federfollikel hat.

Bei der *männlichen Stockente* bringen die Folikel der Flankenregion in den beiden jährlich eintretenden Mauserperioden Federn mit Querbindenmustern von sehr verschiedenem Typus hervor (Fig. 16a, b). Je nach der hormonalen Situation entstehen bei der Frühjahrsmauser *breit schwarz und braun gebänderte Sommerfedern*, bei der Herbstmauser dagegen *Winter-*

federn mit einem feinen schwarzen Rieselmuster auf weißem Grund. Hier bietet sich nun Gelegenheit, die Frage zu prüfen, ob die verschiedenen Formen des Streifenmusters einheitlich als Folgen einer unmittelbaren Auswirkung eines zeitlichen Rhythmus auf die Federdifferenzierung zu verstehen sind, wie sie bei den experimentell hergestellten Mustern vorliegt (31). Nach dem Vorgang von Kuhn (32) kann man nämlich durch vorzeitiges Auszupfen der Federn auch außerhalb der normalen Mauserzeit eine Federbildung einleiten und sogenannte *Umschlagfedern* erzielen, die z. B. in ihrem zuerst gebildeten apikalen Teil den Charakter einer Sommerfeder, im basalen den einer Winterfeder zeigen. Dabei gehen die Randpartien der Feder früher als die axial gelegenen zur Bildung des Wintermusters über, offenbar auf Grund einer höheren Schwelle gegenüber dem Hormonreiz, welcher den Ersatz des neutralen Wintermusters durch das sommerliche bedingt. Man könnte nun erwarten, daß sich eine schnellere oder langsamere Umstellung des angenommenen Rhythmus in dem Muster abzeichnen würde, indem anstelle der breiten Binden des Sommermusters plötzlich oder durch Übergänge mit ihnen verbunden die feinen Rieselstreifen des Wintermusters aufträten. Wie Fig. 16c zeigt, ist dies aber keineswegs der Fall, sondern in der Übergangszone überlagern sich die beiden Muster, indem die feine Winterzeichnung aus den seitlich gelegenen Teilen der Fahne in die hellen Zwischenräume zwischen den dunklen Zonen des axialen Sommermusters eindringt. Nach der Vorstellung, daß die Musterbildung bei der Feder allein auf zeitlichen Verschiedenheiten bestimmter Bedingungen der Differenzierungsprozesse beruht, müßten hier zwei verschiedene zeitliche Rhythmen angenommen werden, die entweder in verschiedenen Teilen der Wachstums- und Differenzierungszone nebeneinander bestehen oder bei gleichem Sitz sich ohne gegenseitige Störung überlagern. Eine solche Annahme erscheint so gezwungen, daß man sie als ausgeschlossen betrachten kann. *Man wird folgern müssen, daß mindestens eine der beiden Musterarten nicht erst während der fortschreitenden Differenzierung der Feder entsteht, sondern vorher im Federkeim durch ein räumlich wirkendes Ordnungsprinzip determiniert wird*, wie es für andere Muster gilt.

Die nähere Untersuchung zeigt, daß die Tendenz zur Ausbildung des *Wintermusters* auch in den sommerlich gezeichneten Federteilen sowie in vollständigen Sommerfedern nicht völlig unterdrückt wird. Sie kann hier je nach der Stärke der Pigmentierung überall zur Geltung kommen, wirkt sich dabei aber etwas anders als bei der Winterfeder aus, indem statt quer zur Federachse gestreckter Elemente rundliche Tupfen entstehen. Beide Formen des Wintermusters erinnern stark an gewisse bei Schmetterlingen auftretende *Simultanrhythmen*, die zweifellos nicht durch einen zeitlichen Rhythmus, sondern durch ein räumlich wirkendes Ordnungsprinzip bedingt sind.

Es bleibt zu fragen, ob etwa die Bindenzeichnung des *Sommermusters* durch einen unmittelbar in die Differenzierung eingreifenden zeitlichen Rhythmus geschaffen wird. Die Variationen im Verlauf der Binden, deren seitliche Teile manchmal bis zur Parallelrichtung mit dem Federschaft abwärtsgebogen sind, machen auch diese Annahme ganz unwahrscheinlich. Der Wechsel der Differenzierungsweise tritt in diesen Fällen an verschiedenen Stellen der Differenzierungszone sicher zu verschiedenen Zeiten ein. Auch das Sommermuster muß also wohl durch ein räumlich wirkendes Musterbildungsprinzip determiniert werden. Es könnte sich um ein Liesegang-Phänomen handeln. Wahrscheinlicher ist es wohl, daß ein die Farbe der dunklen Binden determinierender Faktor sich wiederholt, aber mit abnehmender Reichweite von einem im Basalteil des Federkeimes in der Gegend des präsumptiven Schaftes gelegenen Zentrum her ausbreitet, ähnlich wie es oben S. 240 für gewisse zentrische Rhythmen der Schmetterlinge erwogen wurde. *Soweit diese Vorstellung zutrifft, ist tatsächlich ein zeitlicher Rhythmus an der Bildung gewisser Querbindenmuster auf der Feder beteiligt, doch greift er nicht unmittelbar am Differenzierungsprozeß an, sondern er schafft ein räumliches Determinationsmuster, das nur infolge des zeitlichen Fortschreitens der Differenzierung im Federkeim schrittweise realisiert wird.* Ein solcher Rhythmus würde, wie auch Montalenti aus seinen Ergebnissen für den von ihm angenommenen gefolgert hat, nicht den Gesamtkörper des Tieres, sondern nur den einzelnen Follikel beherrschen. Eine grundsätzliche Sonderstellung braucht man jedenfalls auch dieser Art der Musterbildung auf der Feder nicht zuzuschreiben.

E. Farbmusterbildungen höherer Ordnung und die Frage der primären Musterbildung bei zentrischen Mustern.

Manche mehr oder weniger komplizierte Musterteile sind gegenüber einem ihnen entsprechenden Teil eines einfacheren Musters in der Weise abgewandelt, daß sie nicht wohl durch eine bloße Fortführung oder Abwandlung des zur Bildung des einfachen Musters führenden Prozesses erklärt werden können, noch auch durch den Hinzutritt eines unabhängig von ihm ausgelösten weiteren Musterbildungsvorganges. Vielmehr muß bei ihnen auf einen *Gliederungsprozeß* geschlossen werden, *der erst mit dem Abschluß des ersten und als Folge von ihm in Gang kommt.* Solche *Musterbildungen höherer Ordnung* kommen in mindestens zwei verschiedenen Formen vor.

Im ersten Fall bildet sich in der Umgebung einzelner Zeichnungselemente ein Hof in einer Abschwächungsstufe der Grundfarbe. Zur kurzen Kennzeichnung derartiger Musterbildungen kann man von *Verödungsmustern* sprechen. Tritt die Erscheinung an den von der Mittelzone abgekehrten Seiten der beiden Begleitzonen einer *dreizonigen Binde* auf, so entsteht ein Bindenmuster von im ganzen fünf Zonen, wie es bei Symmetriebinden und bei der als Grenzmuster des Apikalwischs *Apw* in der Flügelspitze auftretenden Apikallinie *Apl* (Fig. 2b) vorkommen kann. Fig. 17a zeigt diesen letzten Fall bei der Saturnide *Rothschildia tucumani*. Vielleicht ist auch eine bestimmte früher (14) bei *Philosamia* experimentell analysierte Art der Musterbildung hierher zu rechnen.

Im Außenteil des Flügels findet sich hier basal der in Fig. 4c im Gebiet der Randfransen sichtbaren Saumlinie (Fig. 2b, *Sl*) eine Randlinie, die als basales Grenzmuster eines bis zum Flügelsaum reichenden Saumfeldes angesehen werden kann und in anderen Fällen häufig in einzelne sogenannte echte Randflecken zerlegt ist. In dem Schema Fig. 2b sind zwei derartige Randlinien *Rl* mit ihren Saumfeldern eingetragen. Zwischen diesem Randmuster und dem in Fig. 2b dreizonig gezeichneten Außenfeldrand *Afr* kann eine besondere, in Fig. 2b durch Punktierung mittlerer Dichte angedeutete Musterart auftreten, die bei manchen Saturniden als Reihe wohlumgrenzter Flecken erscheint und daher als *unechtes Randfleckenmuster UeRfl* bezeichnet wird. Bei Änderungen in der Linienführung des Außenfeldrandes oder der Randlinie ändert sich nun auch die Gestalt der unechten Randflecken, und zwar so, daß sie den Raum zwischen jenen beiden Grenzmustern unter Einhaltung eines bestimmten Abstandes von ihnen erfüllen (Fig. 4c, d). Es scheint demnach, daß die unechten Randflecken die Reste eines eigenen Musterfeldes darstellen, das selbst kein Grenzmuster bildet und durch eine vom Außenfeldrand sowie andererseits von der Randlinie ausgehende, über eine gewisse Entfernung reichende Wirkung ausgelöscht wird.

Bei der zweiten Form von Musterbildungen höherer Ordnung geht ein einfaches Zeichnungselement, das nach einem der verschiedenen früher erörterten Prinzipien als singulare Feldgrenze oder als Glied in einer der unterschiedlichen Arten von rhythmischen Mustern determiniert worden ist, selbst in ein geändertes Feld über. Der Farbton und der sonstige Habitus der Zeichnung macht es in den meisten Fällen wahrscheinlich, daß es sich um *Anreicherungsränder* handelt. Besonders auffällige Beispiele bieten die *Simultanrhythmen* der Säugetiere. Die einzelnen tupfen- oder rieselförmigen Musterteile sind dann in sich gegliedert, indem ihre

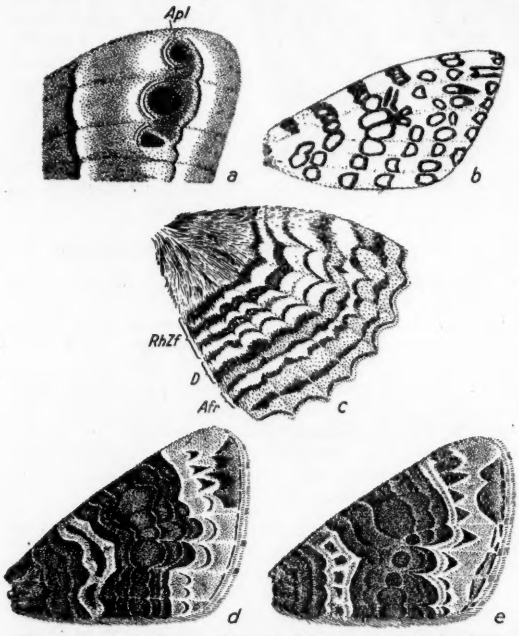


Fig. 17. Musterbildungen höherer Ordnung bei Schmetterlingen; *a, b* bei singularen Mustern, *a* beiderseits der dreizonigen Apikallinie (*Apl*) von *Rothschildia tucumani* Dogn., Saturn. (Verödungsmuster); *b* am gesamten Querbindenmuster von *Ecpantheria spec.* (Arct.); *c—e* an den zentrischen Rhythmen im Zentralfeld (*Rh Zf*), *c Thysania agrippina* L. (Noct.), *D* Distalbinde, *Afr* Außenfeldrand; *d Lygris prunata* L. (Geom.); *e Cidaria [Larentia] silacaeta* Schiff. (Geom.). — *b* nach Süffert (26).

inneren Teile sich, manchmal bis zur Gleichheit, der Farbe des Untergrundes annähern. Rundliche Elemente gehen auf diese Weise in Ringe über, wie bei der Ringelrobbe, und wenn die dunkle Randzone streckenweise unterbrochen wird, entsteht die charakteristische Rosettenzeichnung des Leoparden. Aus langgestreckten Elementen werden Doppelbinden, wie sie beim Tiger vorkommen.

In der *Querbindenzeichnung* der Schmetterlinge wirkt sich die Erscheinung in der von Süffert (26) so benannten *terliären Symmetrie* aus, indem statt einzelner linien- oder bindenförmiger *Musterfeldgrenzen* langgestreckte geränderte Felder entstehen. Besonders eindrucksvolle Bilder erscheinen, wenn die einzelnen Grenzmuster, etwa im Zusammenhang mit dem Geäder, in getrennte Stücke zerlegt sind, indem Reihen von Ringfiguren statt von Flecken auftreten (Fig. 17b). Andere freilich noch nicht sicher als Feldgrenzen festgestellte einzelne Linien oder Binden können gleichfalls die Form geränderter Felder annehmen, so die oben S. 239 erwähnte dunkle Linie innerhalb der Mittelzone der Symmetriebinde. Die besonders bei Saturniden und Geometriden (Fig. 9, 17d, e) häufige Ausbildung der *Symmetriewischzeichnung* im Umfeld in der Form eigener, auch zur Randbildung befähigter Musterfelder erscheint als Variante der Ausbildung des Musters dieser Zone als einfache Linie oder Binde (Fig. 13a, *Ww*, *Aw*). Da an beiden Stellen auch rhythmische Muster auftreten können, die offenbar dem zentrischen Typus angehören, ist es wahrscheinlich, daß auch in diesen Fällen ein geändertes Musterfeld so wie in anderen ein zentrischer Rhythmus an Stelle einer Feldgrenze entstanden ist. Während aber die Rhythmenbildung sich hier auf eine Abwandlung des zur Ausbildung einer einfachen Feldgrenze führenden Vorgangs zurückführen läßt, würde die Ausbildung eines geränderten Feldes an ihrer Stelle eine Fortführung dieses Vorgangs zu einer Musterbildung höherer Ordnung darstellen.

Schließlich kehrt dieselbe Erscheinung auch an den *Einzelgliedern zentrisch gebauter Rhythmen* wieder, wie bei den rhythmischen Linien im Zentralfeld, die den Mittelschatten vertreten können. Bei der großen Noctuide *Thysania agrippina* (Fig. 17c *Rh Zf*) werden die einzelnen dunklen Elemente dieses Systems von innen nach außen schrittweise breiter, die Schärfe der Zeichnung nimmt ab, und zugleich hellen sich ihre inneren Teile auf, so daß man den Übergang einer einfachen Linie in ein geändertes Feld unmittelbar verfolgen kann. Die äußerlich abweichenden Muster im Zentralfeld mancher Geometriden sind grundsätzlich auf die gleiche Form einer Musterbildung höherer Ordnung zurückzuführen. Bei *Lygris prunata* (Fig. 17d) ist das dunkle Infeld des Symmetriesystems durch helle, ein zentrisch gebautes rhyhtmisches Muster bildende Linien in Teilfelder zerlegt, die allseitig einen tiefdunklen Rand ausbilden. Die Dimensionen der hellen und dunklen Anteile des Musters sind also gegenüber dem von *Thysania* vertauscht, und der optische Eindruck des Musters wird nun durch dreizonige Musterelemente beherrscht, die habituell und wohl auch in ihrer Entstehungsweise dreizonigen Symmetriebinden ähneln. Ein Unterschied besteht nur insofern, als die Rolle des Umfeldes, das die äußere Begleitzone der Symmetriebinden liefert, hier ebenfalls von den Teilfeldern des Infeldes, und zwar von ihrem dem Zentrum zugekehrten Teil gespielt wird. In anderen Fällen, so bei *Cidaria silaceata*, sind die Teilfelder weniger selbständig, indem dieser letzte Teil der Musterbildung unterbleibt und eine Randbildung nur an der Außenseite stattfindet, in der Richtung also, in der das Infeld auch die innere Begleitzone der Symmetriebinde ausbildet (Fig. 17e).

Die Musterbildungen höherer Ordnung lenken den Blick noch einmal auf die schon oben S. 205 f. und S. 240 aufgeworfene *Frage nach der Natur des primären Gliederungsvorganges, mit dem der Ort der Ozellenzeichnungen sowie der Determinationszentren für die Querbindenmuster und die sie vertretenden zentrischen Rhythmen bestimmt wird.* Der Mechanismus dieses Vorgangs muß so beschaffen sein, daß er ebensowohl einzelne Musterfelder oder Zentren wie auch mehrere von ihnen nebeneinander hervorrufen kann, denn die vergleichende Untersuchung hat ergeben, daß eine Reihe von Ozellen- und Feldgrenzenmustern bald nur einen einzelnen, meist in der mittleren Flügelregion gelegenen Kern, bald zwei, drei oder auch mehr völlig voneinander getrennte Kerne aufweisen (Fig. 18a-c). *Wenn nun die Determinationszentren an der Peripherie ihrer Ausbreitungsfelder an Stelle einfacher Muster die Ausgangspunkte für eine Musterbildung höherer Ordnung determinieren können, so ist es möglich, daß auch sie selbst nach einem der bei der Farbmusterbildung wirksamen Prinzipien entstehen.*

Die bisher experimentell untersuchten Arten mit ihren meist nur einzeln auftretenden Musterkernen bieten freilich zunächst noch keinen Anlaß, diese Vor-

stellung näher zu präzisieren. Nun erinnern aber die früher (8) beschriebenen hochadaptiven Ozellenzeichnungen gewisser Saturniden mit ihren zahlreichen und völlig regellos verteilten, bald Tautropfen, bald Fraßspuren (Fig. 18d) auf einem Blatt vortäuschenden Einzelgliedern stark an die oben S. 241 erwähnten *Spritzmuster* mit ihren nach Anordnung und Größe gleich unregelmäßigen, dabei aber ungegliederten Einzelflecken, deren Determination auf der Bildung oder Aussonderung bestimmter Stoffe unter dem Einfluß zufallsmäßig verteilter Keimwirkungen zu beruhen scheint (Fig. 15g). Weiterhin erweckt die gleichmäßige Größe und Anordnung der Kerne bei den Symmetriesystemen mancher Kleinschmetterlinge mit ihrer verhältnismäßig großen Anzahl von Kernen auf einem kleinen Flügel, wie etwa bei dem in Fig. 18c wiedergegeben Fall, stark den Eindruck eines *Simultanrhythmus*, der seinerseits, wenn er in einfacher Form auftritt, vielfach als Fortbildung eines ungeordneten Spritzmusters erscheint (vgl. Fig. 15g, b und a). Der Aufbau der einzelnen Kerne in einem Symmetriesystem wie dem der Fig. 18c ist als Folge einer einfachen Anreicherungsrandbildung zu verstehen, wie sie auch sonst häufig als einzige Gliederung der Symmetriemusterkerne vorkommt. *In solchen Fällen scheinen also der Ausbildung einer Mehrheit von Musterfeldern oder Determinationszentren die gleichen Determinationsvorgänge zugrunde zu liegen, die auch bei der Festlegung der zahlreichen ungegliederten Elemente eines einfachen Simultanrhythmus wirksam sind.*

Fig. 18. Verschiedene Formen der Kernbildung bei zentrischen Schmetterlingsmustern. *a—c* zentrale Symmetriesysteme, *a* einkernig, *Metrocampa margaritata* L. (Geom.); *b* zweikernig, *Larentia sagittata* Fabr. (Geom.); *c* vielkernig in Form eines Rieselmusters, *Argyroploce rivulana* Sc. (Tort.); *d* vielkernige Discoidaladerzeichnung in Form eines Spritzmusters, *Solus drepanoid s* Moore (Saturn.).

Nach denselben Prinzipien könnten nun aber recht wohl auch in geringer Anzahl oder einzeln gesetzmäßig an bestimmten Orten auftretende Determinationszentren durch primäre Musterbildung festgelegt werden. Bei der Bildung eines Simultanrhythmus wird eine Mehrzahl von Elementen so angeordnet, daß sie den verfügbaren Raum gleichmäßig zwischen sich aufteilen. Die Größe und Form dieser Elemente, die Abstände zwischen ihnen und damit auch ihre Anzahl werden außer von etwa schon vorhandenen Strukturen von den Ausmaßen und den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Systems abhängen, das die Gliederung ausbildet. Je kleiner das System und je geringer die Anzahl der Elemente ist, um so merklicher wird schließlich auch der Einfluß der Form des Gesamtsystems auf die Lage der einzelnen Elemente hervortreten. In Grenzfällen werden diese verschiedenen Bedingungen so beschaffen sein, daß *statt eines rhythmischen Musters nur ein einziges Element*, sei es ein Zeichnungselement oder ein Determinationszentrum entsteht. Der Gewinn dieser Betrachtung liegt in der *Arbeitshypothese, daß die verschiedenen Formen primärer Musterbildung, mit denen zunächst gerechnet werden mußte, die Schaffung einzelner Musterfelder oder Determinationszentren an einem bestimmten, aber nicht strukturell vorgebildeten Ort und die Bildung einer Mehrheit von Elementen in der Form eines Simultanrhythmus als einheitliches Problem behandelt werden können*, weil ein allein entstehendes Element innerhalb des Raumes, in dem die Bedingungen für seine Ausbildung eingetreten sind, durch den gleichen Mechanismus lokalisiert werden kann, der auch einem zwischen mehreren gleichartigen auftretenden seinen Platz anweist.

Es ist sicher anzunehmen, daß vielfach die zur Farbmusterbildung führenden Vorgänge, ebenso wie sie auf die Zellteilungstätigkeit einwirken, auch die Strukturentwicklung beeinflussen. Auch werden manche nicht mit Farbzeichnungen zusammenhängende Formen und Strukturen durch gleichartige Mechanismen geschaffen werden, wie sie hier aus der Betrachtung der Farbmuster erschlossen werden.

F. Übersicht: Die Stufen der Musterbildung.

Überblickt man die geschilderten Ergebnisse über die Bildung der Farbmuster, so erscheint sie als eine *Kette von Determinationsprozessen*, bei der jedes Glied einen neuen, das Muster verändernden oder weiter ausgestaltenden Vorgang einleiten oder aber den Abschluß der Kette bilden kann, an den sich die Ausdifferenzierung des Musters entsprechend dem erreichten Gliederungszustand anschließt. So ist es möglich, Reihen normaler Muster aufzustellen, an denen der Fortgang der Musterdetermination wie an fixierten Entwicklungsstadien abzulesen ist.

Die Entwicklungsfaktoren, welche die einzelnen Pigmente und farbgebenden Strukturen der Farbmuster bedingen, sind ihrer Natur nach nicht näher bekannt, doch drängen die Formtypen der Muster, in denen sie sich ordnen, und die Art der aus Experimenten und spontanen Variationen der Muster erschlossenen Ordnungsvorgänge zu der Arbeitshypothese, daß es sich im wesentlichen um verschiedene *Determinationsstoffe* handelt, die einzeln und im Zusammenwirken, nach- und nebeneinander ihren Einfluß auf die Differenzierungsrichtung der Zellen ausüben. An Hand dieser Vorstellung lassen sich die bisher erfaßten Musterbildungsvorgänge in einer kurzen Übersicht zusammenfügen.

Bei der abhängigen Musterbildung treten die Determinationsstoffe für eine bestimmte Farbe im Anschluß an gesetzmäßig vorgebildete Strukturen auf. Als Anfangsstufe der *freien Musterbildung in einem homogenen Substrat* erscheint die Ausbildung regellos angeordneter Flecken von wechselnder Größe (Fig. 19a), welche offenbar das Abbild der *Wirksamkeit zufallsmäßig verteilter Keime* auf die Ansammlung oder Ausfällung eines Determinationsstoffes oder auch auf seine Entstehung in einer bestimmten chemischen Reaktion darstellen. Einzelne Glieder eines solchen im ganzen frei gebildeten Musters können sich nach dem Prinzip der abhängigen Musterbildung an vorgebildete Musterörter anschließen. Wohl durch die Auslesewirkung eines Wettbewerbs zwischen diesen Keimen geht das unregelmäßige Muster in eine gesetzmäßige Ordnung von Einzelelementen, einen Simultanrhythmus über, dem die abhängigen Elemente eingefügt bleiben können (Fig. 19b—e). Im Grenzfall entsteht nur ein einzelnes Element an einem durch die Gesamtform des Musterträgers bestimmten Ort(f). Wird das Muster auf dieser Stufe ausdifferenziert, so

erscheint ein Simultanrhythmus aus einfachen Mustergliedern, deren Form, Größe und Anzahl von den allgemeinen Bedingungen des Substrats abhängen, oder ein einzelnes homogenes Musterfeld. Nimmt die Konzentration des Determinationsstoffes nach den Rändern des Musterelementes zu ab, so erscheint im fertigen Zustand ein Farbgefälle. Bei umschlagender Reaktionsweise der Epithelzellen können auf diese Weise auch Ozellen mit zwei oder mehr konzentrisch angeordneten verschiedenfarbigen Zonen entstehen (g).

Andererseits kann aber die Musterbildung auch weiter fortschreiten, und zwar dadurch, daß der Determinationsstoff sich an den Rändern der von ihm besetzten Bereiche ansammelt. Dieser Vorgang ist wenigstens bei bestimmten Mustern mit einer *Ausbreitung* verbunden, durch die der Determinationsstoff über den ursprünglich besetzten, nun als *Determinationszentrum* wirkenden Bereich hinaus vordringt. Die Grenzen, an denen der Ausbreitungsvorgang erlischt, sind vielfach durch vorgebildete Grenzmusterörter bestimmt. Im Farbmuster erscheint als Ergebnis dieser Prozesse ein Musterfeld mit einem *Anreicherungsrand* (h, i). Die Ausbreitung des Determinationsstoffes kann aber auch in der Form eines Liesegang-Phänomens vor sich gehen und ein *zentrisch gebautes rhythmisches Farbmuster* aus mehreren gleichartigen bindenförmigen Elementen hervorrufen (n).

Gruppen von konzentrisch angeordneten ungleichartigen Binden kommen dadurch zustande, daß *in derselben Region mehrere verschiedenartige Determinationszentren* auftreten. Die Querbindenzeichnung der Schmetterlinge besteht zum großen Teil aus solchen zusammengesetzten Mustern. Die einzelnen Zentren können sich nacheinander zu Determinationsfeldern ausbreiten und bilden dann jeweils ein eigenes Zeichnungssystem (k—m). Das Zentrum, das sich zuerst ausbreitet, bildet das größte, das letzte das kleinste Determinationsfeld, teils weil die später einsetzenden Ausbreitungsvorgänge unter einem schwächeren Antrieb stehen oder von näher am Zentrum gelegenen vorgebildeten Grenzmusterörtern angehalten werden, teils weil sie die von dem früher begonnenen Ausbreitungsprozeß erreichte Linie nicht überschreiten können. In manchen Fällen werden sie auch in einem bestimmten konstanten Abstand vor dieser Linie angehalten. Breiten sich zwei verschiedenartige Determinationsfelder von derselben Region her ungefähr gleichzeitig aus, so bilden sie zusammen ein Zeichnungssystem. Auch an der Peripherie eines Determinationsfeldes, das keinen Anreicherungsrand zeigt, kann ein Randmuster erscheinen, und zwar dadurch, daß ein zweites Determinationsfeld in seinem Inneren auftritt, welches eine Randzone des ersten als *Aussparungsrand* freiläßt (o, p). Bildet sich zugleich an dem kleineren Feld ein Anreicherungssrand, so entsteht ein Bindenmuster mit zwei Farbzonen (q). Über die Verhältnisse, die zur Entstehung mehrerer von derselben Region her sich ausbreitender Determinationsfelder führen, läßt sich bisher nur aussagen, daß jeweils das kleinere nur auftritt, wenn das nächstgrößere groß genug ist, um ihm in seinem Inneren Raum zu geben. Manchmal führt ein nach dem Prinzip des Simultanrhythmus ablaufender primärer Gliederungsprozeß zur Ausbildung mehrerer gleichartiger ausgezeichneter Punkte in verschiedenen Regionen, von denen jeder nacheinander die gleiche Reihe verschiedenartiger Zentren hervorbringt. Die bildungsgleichen Determinationsfelder der verschiedenen Gebiete können dann jeweils ganz oder teilweise miteinander verschmelzen oder aber sich an der Bildung mehrerer räumlich getrennt bleibender gleichartiger *Musterkerne* beteiligen.

Außer der Einleitung der Randmusterbildung in seinem eigenen Bereich kann ein Determinationsfeld auch auf die Musterbildung in seiner Umgebung einwirken, indem es die selbständige Randbildung eines benachbarten geränderten Feldes unmittelbar an der Grenze des eigenen Farbmusters oder in einem gewissen Abstand von ihr lokalisiert, oder indem es

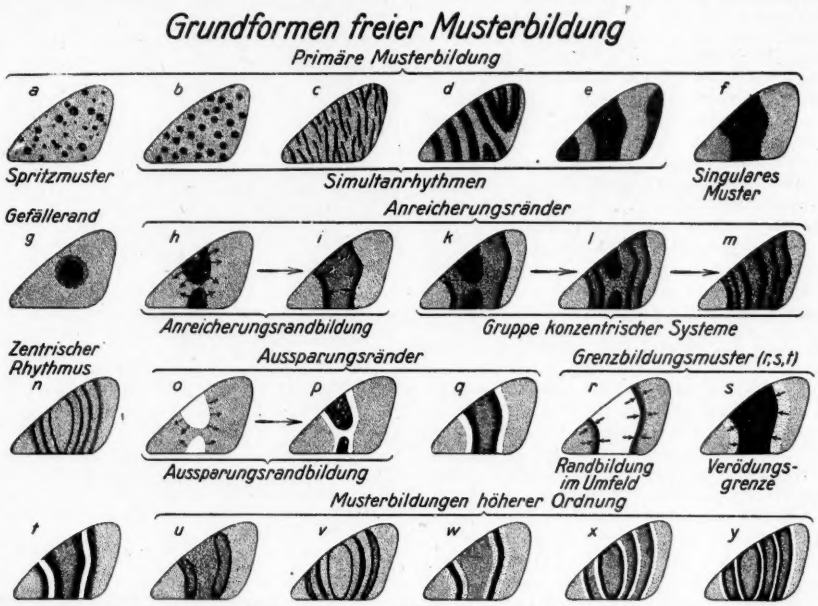


Fig. 19. Grundformen freier Musterbildung, schematisch. Als Beispiele sind zu vergleichen: zu *a*: Fig. 15g; zu *b*: Fig. 15 *a*, *b*; zu *c*: Fig. 15c, *d*; zu *d*: Fig. 18c; zu *e*: Fig. 17 d, e; zu *f*: Fig. 18a; zu *g*: Fig. 4; zu *h*, *i*: Fig. 18c, d; zu *k*—*m*: Fig. 3, 6, 13a; zu *n*: Fig. 13b, c; zu *o*—*q*: Fig. 18b; zu *o*—*r*, *t*: Fig. 5; zu *s*, *w*: Fig. 17a; zu *u*: Fig. 17b; zu *v*: Fig. 17c; zu *x*: Fig. 17e; zu *y*: Fig. 17d.

auch erst das Determinationsfeld eines anderen Zeichnungssystems, in dessen Bereich es liegt, zur Bildung eines Anreicherungsrandes veranlaßt (r). So kommt es zur Ausbildung von *Grenzbildungsmustern*, an deren Determination im Unterschied zu den Randbildungsmustern Entwicklungsfaktoren aus den beiden aneinanderstoßenden Feldern beteiligt sind. Eine von der *Anreicherungsrandbildung im Umfeld eines Determinationsfeldes* (r) verschiedene Form einfacher Grenzbildungsmuster scheint dadurch zustandezukommen, daß dem Umfeld in einer dem Determinationsfeld benachbarten Zone ein die Farbbildung des ersten bestimmender Determinationsstoff teilweise entzogen wird. So kann eine einzelne Grenzzone mit einer abgeschwächten Schattierung der Grundfarbe, eine *Verödungsgrenze* entstehen (s). Eine sichere Abgrenzung dieser Erscheinung von der Anreicherungsrandbildung im Umfeld ist aber noch nicht möglich. Kompliziertere Grenzbildungsmuster können unter anderem durch ein Zusammenwirken mehrerer, z. T. verschiedener Randbildungsvorgänge in benachbarten Determinationsfeldern entstehen. Fig. 19 t veranschaulicht einen schon mehrfach analysierten Fall dieser Art, bei dem wie in q im Bereich eines in der Flügelmitte gelegenen Determinationsfeldes ein Aussparungs- und ein Anreicherungsrand entstanden sind und außerdem das Umfeld wie in r einen Anreicherungsrand ausgebildet hat.

Eine letzte Stufe der Musterbildung wird dadurch erreicht, daß die durch die bisher betrachteten Mechanismen entstandenen Rand- und Grenzbildungsmuster der Determinationsfelder oder die einzelnen Glieder der von ihnen ausgebildeten rhythmischen Zonenfolge nicht als solche in der zunächst erreichten Form ausdifferenziert werden, sondern *weitere Gliederungsprozesse* durchmachen oder einleiten. Einzelne Binden oder Glieder einer rhythmischen Zonenfolge können einen Anreicherungsrand hervorbringen (u,v). In anderen Fällen veranlassen sie das Auftreten von Differenzierungsunterschieden in ihrer zunächst homogenen Umgebung. Dies kann dadurch geschehen, daß sie ihrerseits Verödungsgrenzen ausbilden, so daß im ausgefärbten Muster an ihrer Peripherie ein Hof in einer abgeschwächten Stufe der Untergrundfarbe erscheint (w). Schließlich können auch die Zonen eines rhytmischen Musters von zentrischem Aufbau in den von ihnen abgegrenzten Teilfeldern des Determinationsfeldes einer anderen Musterart die Ausbildung von Anreicherungsrändern ermöglichen, und zwar jeweils entweder nur an einer durch die Ausbreitungsrichtung des unterteilten Feldes bestimmten Seite (x) oder mehr oder weniger gleichmäßig in allen Richtungen (y). Im einen Fall entstehen zwei-, im anderen dreizonige zentrische Rhythmen, die in gewisser Weise den zwei- und dreizonigen Einzelbinden in Fig. 19q und t vergleichbar sind.

Die vergleichend-morphologische und die experimentelle Analyse der Farbmuster erlaubt es also, die Entstehung eines reichgegliederten Zustandes auf wenige *einfache Grundvorgänge* der Entwicklung zurückzuführen: Die diffuse oder örtlich begrenzte *Entstehung oder Aussonderung bestimmter Determinationsstoffe*, die *Ansammlung* der diffus entstandenen an bestimmten Stellen, ihre *Ausbreitung* von bestimmten Zentren aus, ihre *Anreicherung* an den Rändern des eigenen oder des von einem anderen Stoff besetzten Bereichs und vielleicht schließlich ihr Verbrauch in bestimmten Gebieten, der eine Verödung der Nachbarschaft zur Folge hat. Diese Grundvorgänge können sich in einer *Stufenfolge* aneinanderschließen, nicht unähnlich dem Gang der Determinationsprozesse, der zur Ausbildung und Gliederung des Embryo führt. Durch die Mitwirkung der Biochemie und der physikalischen Chemie ließe sich die Analyse des Entwicklungsgeschehens am Beispiel der Farbmuster wahrscheinlich noch weiter fördern.

Eingegangen am 1. Juli 1948.

Literatur.

(1) K. Henke, Naturwiss. **34**, 149, 180 (1947). — (2) K. Henke, E. v. Finck und S. Y, Ma, Z. ind. Abst.-Vererbungsl. **79**, 267 (1941). — (3) K. Henke und H. Maas, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl., Biol.-Physiol.-Chem. Abt. **1946**, 3. — H. Maas, Roux' Archiv. Im Druck. — (4) K. Kühne, Z. Morph. u. Anthropol. **34** (1934). — Die Zwillingswirbelsäule, Ebenda **35** (1936). — (5) K. Henke, Biol. Zbl. **64**, 98 (1944). — (6) K. Henke und G. Kruse, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. **1941**, 138. — (7) F. Süffert, Biol. Zbl. **47**, 385 (1927). — (8) K. Henke, Nova Acta Leopoldina, Halle, N. F. **4**, 1. Nr. 18 (1936). — (9) K. Henke, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. **1943**, 1. — (10) A. Kühn und M. v. Engelhardt, Roux' Archiv **130**, 660 (1933). — (11) H. Lemche, Entomol. Meddel. **24**, 127 (1944). — Ebenda, **24**, 347 (1945). — (12) H. Lemche, Entomol. Meddel. **24**, 305 (1945). — (13) R. Goldschmidt, Physiologische Theorie der Vererbung, Berlin (1927). — (14) K. Henke, Roux' Archiv **128**, 15 (1933). — (15) K. Magnussen, Roux' Archiv **128**, 447 (1933). — (16) A. Kühn und M. v. Engelhardt, Biol. Zbl. **64**, 24 (1944). — (17) R. Goldschmidt, Lymantria. Bibliographia genetica **11**, 1 (1934). — (18) K. Henke, Biol. Zbl. **53**, 165 (1933). — (19) A. Kühn und M. v. Engelhardt, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. N. F. Fachgr. VI, **2**, 171 (1936). — (20) A. Kühn und K. Henke, Genetische und entwicklungsphysiologische Untersuchungen an der Mehlmotte Ephestia kühniella Zeller XIII, XIV. Abh. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. N. F. **16**, 225 (1936). — (21) K. Henke, Roux' Archiv **142**, 621 (1944). — (22) W. Köhler, Z. Morph. Ökol. Tiere **24**, 582 (1932). — (23) K. Henke, Verhandl. dtsch. Zool. Ges. **1935**, 176. — (24) E. Becker, Z. vergl. Physiol. **24**, 305 (1937). — (25) K. Henke, Naturwiss. **21**, 633, 654, 665, 683 (1933). — (26) F. Süffert, Roux' Archiv **120**, 299 (1929). — (27) W. Köhler und W. Feldotto, Arch. Jul. Klaus-Stiftg. **10**, 314 (1935). — (28) H. Krieg, Roux' Archiv **51**, 24 (1922). — Die Prinzipien der Streifenzeichnung bei den Säugetieren, abgeleitet aus Untersuchungen bei den Einhufern. Vortr. u. Aufs. üb. Entw. mech. Org. hersg. v. Roux, H. 30 (1922). — (29) F. R. Lillie und M. Juhn, Physiol. Zool. **5**, 124 (1932). — (30) G. Montalenti, J. exp. Zool. **69**, 269 (1934). — (31) K. Henke, Biol. Zbl. **59**, 459 (1939). — (32) O. Kuhn, Roux' Archiv **127**, 456 (1932).

Über Isosterie (1).

Von Josef Goubeau.

Aus dem Anorganisch-Chemischen Institut der Universität Göttingen.

Der Begriff der Isosterie wurde von I. Langmuir (2) im Verfolg von Gedankengängen G. N. Lewis' über die chemische Bindung eingeführt. Er stellte fest, daß Moleküle mit gleicher Zahl von Atomen bei gleicher Anzahl von Elektronen diese in gleicher Weise anordnen können, was eine „bemerkenswerte Ähnlichkeit" der Moleküle in ihren physikalischen Eigenschaften zur Folge hat. Als besonders deutliche Beispiele wurden von ihm die Molekülpaare Kohlenoxyd — Stickstoff, Kohlendioxyd — Distickstoffoxyd, Azide — Cyanate u. a. herausgestellt. Später wurde dann von E. Wiberg (3) im Benzol — Borazol $B_3N_3H_6$ (organisches — anorganisches Benzol) ein besonders eindrucksvolles Beispiel eines isosteren Molekülpaares aufgefunden, dem dieser Autor mit seinen Mitarbeitern (4, 5) durch seine ausgezeichneten Experimentalarbeiten eine der organischen Chemie isostere Borstickstoffchemie folgen ließ. Ähnliche Gedankengänge wurden auch von W. Hückel (6) entwickelt, und auch er schließt bei isosteren Molekülen aus der weitgehenden Ähnlichkeit in zahlreichen physikalischen Eigenschaften

auf ähnliche Anordnung der Elektronen und damit ähnliche Bindungsverhältnisse.

Da in dem so definierten Begriff „Isosterie" die „weitgehende" oder „bemerkenswerte" Ähnlichkeit der Moleküle in ihren physikalischen Eigenschaften mit einbezogen ist, eine höchstens sehr umständlich genau festzulegende Bedingung, so haftet diesem Begriff eine erhebliche Unsicherheit an. Deshalb wird Isosterie in der Literatur auch häufig verschieden ausgedeutet. H. G. Grimm (7) z. B. bezeichnet als isoster alle Verbindungen, die bei gleicher Anzahl von Atomen gleiche Anzahl von Gesamt- und Valenzelektronen besitzen (Isosterie im engeren Sinn), bzw. Verbindungen, die bei gleicher Anzahl von Atomen nur noch gleiche Anzahl von Valenzelektronen aufweisen (Isosterie im weiteren Sinn). Die Ähnlichkeit geht in diese Definition nicht mit ein, wird aber oft stillschweigend mit eingeschlossen. Im Rahmen dieser Abhandlung soll mit einem möglichst genau definierten Begriff gearbeitet werden. Deshalb werden als isoster im folgenden solche Moleküle bzw. Ionen bezeichnet, die bei gleicher Anzahl von Atomen im Molekül bzw. Ion gleiche Zahl von Gesamt- und Valenzelektronen besitzen und isoelektrisch sind. Nur bei letzterer Bedingung ist ein Vergleich der physikalischen Eigenschaften sinnvoll. Ein derartiger Vergleich soll im folgenden durchgeführt werden, um einzelne Faktoren zu ermitteln, die für Ähnlichkeit bzw. für Unähnlichkeit verantwortlich sind, und um daraus Rückschlüsse auf Bindungsverhältnisse zu ziehen.

Allgemein können isostere Verbindungspaare auf Grund einer einfachen Regel erhalten werden, indem von zwei Atomen einer beliebigen Verbindung das eine durch ein Atom mit einer um n kleineren, das andere durch ein Atom mit einer um n größeren Ordnungszahl ersetzt wird. Es lassen sich natürlich auch kompliziertere Fälle konstruieren, bei denen gleichzeitig mehr als zwei Atome verändert werden. Diese sollen jedoch nicht berücksichtigt werden, ebenso wie die durch den Hydridverschiebungssatz von H. G. Grimm gegebenen Möglichkeiten.

Als einfaches Beispiel dieser Art soll folgende Reihe betrachtet werden:

	C C	B N	Be O	Li F
Gesamtelektronen	6 + 6	5 + 7	4 + 8	3 + 9
Valenzelektronen	4 + 4	3 + 5	2 + 6	1 + 7

Es handelt sich um Verbindungen mit gleicher Anzahl von Atomen, gleicher Zahl von Gesamt- und Valenzelektronen. Der wesentliche Unterschied beruht auf den verschiedenen Kernladungen, die sich durch die davon abhängigen Eigenschaften, wie Elektronenaffinität, Polarisierbarkeit usw. auswirken. Diese Verschiedenheit äußert sich drastisch in dieser Reihe isosterer Verbindungen, die sich von Diamant, Graphit, über Borstickstoff zum Lithiumfluorid erstreckt. Von einer Ähnlichkeit zwischen Diamant bzw. Graphit und Lithiumfluorid kann keine Rede sein. Während sich im Diamant die einzelnen C-Atome noch vollständig gleichwertig in die 8 Valenzelektronen teilen unter Bildung homöopolarer Bindungen, werden im Lithiumfluorid sämtliche acht Valenzelektronen ausschließlich vom stärker elektronenaffinen Fluor beansprucht; es resultiert eine polare Bindung. Es ergibt sich also für diese beiden isosteren Verbindungen, welche die Extreme dieser Reihe darstellen, eine vollständig verschiedene Verteilung der Elektronen. Die übrigen stehen graduell zwischen diesen beiden Extremen. Im Graphit und Borstickstoff enthält diese Reihe jedoch ein Stoffpaar, das auch im Sinne der Langmuirschen Definition als isoster bezeichnet werden darf, wie die Gegenüberstellung einiger Eigenschaften in Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1. *Eigenschaften von Borstickstoff und Graphit.*

	Borstickstoff	Graphit
Kristallsystem	D^4_{6h}	D^4_{6h}
Abstände B—N bzw. C—C in ÅE	1.48	1.45
Abstand der Schichtebenen in ÅE	3.35	3.35
Dichte	2.25	2.22—2.30
Schmelzpunkt	~ 3000° (?)	über 3500°
Siedepunkt	sublimiert	sublimiert
Löslichkeit in H_2O, HF, HCl	unlöslich	unlöslich
Härte	talkähnlich	0.5—1
Leitfähigkeit bei gewöhnl. Temp.	Nichtleiter	Halbleiter
Farbe	weiß	grau

Bei aller Ähnlichkeit der beiden Verbindungen ergeben sich doch in einigen wesentlichen Punkten, wie Farbe und elektrischer Leitfähigkeit, deutliche Unterschiede. Diese sind auf die verschiedene Kernladung von Bor und Stickstoff zurückzuführen. Während im Graphit bei vollständig gleichwertigen Kohlenstoffatomen die Elektronen z. T. frei beweglich sind, Farbe und Leitfähigkeit bedingend, sind sie im Borstickstoff an den stärker elektronenaffinen Stickstoff gebunden. Dieses „isostere Paar" zeigt damit deutlich die Unzulänglichkeit der Langmuirschen Definition, da hier die Frage aufgeworfen werden kann, ob dieser Unterschied in den Eigenschaften groß genug ist, um das Verbindungspaar als nicht mehr isoster zu bezeichnen. Aus diesen einfachen Überlegungen muß gefolgert werden, daß isostere Moleküle sich wesentlich in den Ladungen ihrer Kerne unterscheiden, die Unterschiede vor allem in den Polaritäten der Einzelbindungen verursachen. Ähnliche Verteilung der Elektronen und damit Ähnlichkeit in den physikalischen Eigenschaften sind nur dann zu erwarten, wenn die Unterschiede in den Kernladungen möglichst niedrig gehalten werden. Diesen Forderungen genügen die klassischen Beispiele der Isosterie. Es sollen deshalb im folgenden nur noch solche Molekülpaare betrachtet werden, in denen Unterschiede von nur einer Kernladung vorliegen.

Hierzu zählen Bor-Stickstoffverbindungen, die mit Äthanverbindungen isoster sind und die nach der Nomenklatur von Stock-Wiberg als „Borazanderivate" bezeichnet werden. Willkürlich ausgewählte Beispiele derartiger Molekülpaare sind in Tabelle 2 mit ihren Schmelz- und Siedepunkten zusammengestellt. Von den zahlreichen physikalischen Eigenschaften wurden diese beiden Temperaturpunkte ausgewählt, einmal, weil sie von den meisten Stoffen mit einiger Sicherheit bekannt sind, zum anderen, weil sie ein besonders empfindliches Kriterium für die Ähnlichkeit von Molekülen bieten, worauf schon I. Langmuir (2) hingewiesen hat. Dies ist auch verständlich, da sich die unterschiedliche Polarität der Bindungen und der Moleküle in den zwischenmolekularen Kräften und damit im Schmelzpunkt und Siedepunkt besonders deutlich auswirkt (8).

Die nachstehende Tabelle 2 zeigt, daß sämtliche Borazanderivate ebenso wie das Aluminiumchloridmonamin bei Zimmertemperatur fest sind und teilweise recht hohe Schmelz-, Siede- bzw. Zersetzungspunkte aufweisen, während die Äthanverbindungen bei denselben Temperaturen flüssig, ja teilweise gasförmig sind. Auch in anderen Eigenschaften, wie in den Löslichkeiten, treten deutliche Unterschiede auf. So ist $BF_3 \cdot NH_3$ in allen organischen Lösungsmitteln unlöslich, während CF_3CH_3 deutlich löslich oder mischbar ist. Ähnliches gilt auch für $B(OCH_3)_3 \cdot NH_3$, das bei seiner Darstellung aus der ätherischen Lösung ausfällt (11), während der isostere o-Essigsäuremethylester damit mischbar ist (17). Diese isosteren Molekülpaare unterscheiden sich demnach sehr aus-

geprägt in ihren Eigenschaften und damit wohl auch in ihren Bindungsverhältnissen, eine Folge der verschiedenen Kernladung von Bor und Stickstoff. Allerdings ergeben sich innerhalb der betrachteten Verbindungspaare interessante Abstufungen der Unterschiede. Beim $BF_3 \cdot NH_3$, ebenso wie bei $AlCl_3 \cdot NH_3$, sind die Unterschiede wesentlich größer als bei $B(CH_3)_3 \cdot NH_3$. $B(CH_3)_3 \cdot N(CH_3)_3$ zeigt weitgehende Übereinstimmung.

Daneben ist der Einfluß der Substituenten zu berücksichtigen. Aus der organischen Chemie ist bekannt, daß ein stark negatives Atom wie das Fluor auf eine Kohlenstoffkette den sogenannten alternierenden Effekt (A-Effekt) ausübt (19): das benachbarte C-Atom wird durch die Lockerung der gesamten Elektronenhülle positiver, das nächste entsprechend negativer. In analoger Weise wird auch der Einfluß auf die B←N-Bindung sein. Ist also das Bor mit Fluor substituiert, dann wird es positiver sein, als wenn es mit H-Atomen oder CH_3-Gruppen besetzt ist. In einem solchen Fall wirkt der Substituenteneffekt der ursprünglich angenommenen Ladungsverteilung der Bor-Stickstoff-Bindung ebenfalls entgegen. Sitzen dagegen die Fluoratome am Stickstoff, so ist der Effekt genau umgekehrt, und es ist zu erwarten, daß die beiden mit CH_3CF_3 isosteren Verbindungen $BF_3 \cdot NH_3$ und $BH_3 \cdot NF_3$ (noch nicht bekannt) sich in ihren Eigenschaften wesentlich unterscheiden. Ein derartiger Unterschied äußert sich schon in den beiden isosteren Verbindungen $BH_3 \cdot N(CH_3)_3$ und $B(CH_3)_3 \cdot NH_3$ (Tab. 2), obwohl sich H- und CH_3- in den Polaritäten ihrer Bindungen ähnlich sind.

Tabelle 2. *Schmelz- und Siedepunkte einiger isosterer Stoffpaare.*

Borazanderivate			Äthanderivate				
	FP	KP		FP	KP	ΔFP	ΔKP
BF_3NH_3 (9)	~ 180°*)	—	CF_3CH_3	—107°	—47°	287°	227°
BF_3NH_2OH (10)	~ 155°**)	—	CF_3CH_2OH	—	74°	> 150°	> 80°
$B(OR)_3NH_3$ (11)	72°***)	—	$C(OR)_3CH_3$	—	108°	> 70°	—
$B(CH_3)_3NH_3$ (12)	73°	98°	$C(CH_3)_3CH_3$	—17°	10°	90°	88°
$BH_3N(CH_3)_3$ (13)	94°	171°	$CH_3C(CH_3)_3$	—17°	10°	111°	161°
$B(CH_3)H_2N(CH_3)_3$ (5)	1°	176°	$C(CH_3)H_2C(CH_3)_3$	—98°	50°	99°	126°
$B(CH_3)_2HN(CH_3)_3$ (5)	—18°	171°	$C(CH_3)_2HC(CH_3)_3$	—25°	81°	7°	90°
$B(CH_3)_3N(CH_3)_3$ (14)	120°	—	$C(CH_3)_3C(CH_3)_3$	101°	107°	19°	> 13°
$AlCl_3NH_3$ (15)	125°	422°	$SiCl_3CH_3$ (16)	—90°	67°	215°	355°

*) Beginnende Sublimation, **) unter Zersetzung, ***) Zersetzungspunkt.

Der wesentliche Unterschied ist in der Verschiedenheit der rein homöopolaren C—C-Bindung und der sogenannten semipolaren oder koordinativen B←N-Bindung zu suchen. Daneben werden aber auch die verschiedenen Polaritäten der C—F- bzw. B—F-Bindungen bzw. der übrigen Substituentenbindungen von Bedeutung sein. Betrachten wir zunächst die C—C- und B←N-Bindung, so ist in beiden Fällen ein bindendes Elektronenpaar vorhanden. Während bei der C—C-Bindung jedes der gebundenen Atome ein Elektron zur Bindung beisteuert, wird bei der B←N-Bindung das bindende Elektronenpaar allein vom Stickstoff zur Verfügung gestellt, angedeutet durch den Pfeil am Bindestrich. Diese Bindungen können Bindekräfte erreichen, die von gleicher Größenordnung sind wie rein homöopolare Bindungen (9, 18). Die teilweise sehr große Beständigkeit der hier betrachteten Verbindungen sowie von zahllosen Koordinationsverbindungen, bei denen diese Bindungsart ganz allgemein anzutreffen ist, genüge als Hinweis für diese Tatsache.

Um ein Bild von der Ladungsverteilung (Polarität) bei dieser Art Bindung zu erhalten, sollen zwei verschiedene Wege beschritten werden. Einmal kann die Bindung nach Lewis als bedingt durch das gemeinsame Elektronenpaar betrachtet werden, zum anderen kann sie nach Kossel auf polare Kräfte zurückgeführt werden. Im ersteren Fall wird das bindende Elektronenpaar ohne Berücksichtigung aller Substituenteneinflüsse zunächst gleichmäßig auf die beiden gebundenen Atome B und N verteilt. Dabei erhält das Bor durch die Aufnahme eines Elektrons eine negative Ladung, der Stickstoff durch Elektronenabgabe eine positive Ladung. Nun ist aber aus Molekülen wie J—Cl, Cl—F u. a. bekannt, daß das bindende Elektronenpaar sich nicht gleichmäßig zwischen zwei verschiedenen Atomen aufteilt, wie es bei der Chlormolekel oder beim Äthan der Fall ist. Das stärker elektronenaffine Element beansprucht das bindende Elektronenpaar mehr für sich, wie die Dipolmomente derartiger Moleküle u. a. zeigen. Dieser Effekt tritt auch bei der Bor-Stickstoff-Bindung auf und hat zur Folge, daß der stärker elektronenaffine Stickstoff das bindende Elektronenpaar mehr für sich beansprucht, wodurch die ursprünglich angenommene Polarität der Bindung kleiner wird. Über den Grad dieser Minderung, der prinzipiell bis zur vollen Kompensierung führen kann, läßt sich zunächst nichts aussagen.

Ein grundsätzlich anderes Bild von der Polarität der B←N-Bindung ergibt sich, wenn die Verbindungsbildung nach Kossel auf eine Dipolanziehung zurückgeführt wird. Ammoniak ist pyramidal gebaut und deshalb ein Dipol mit dem Stickstoff als negativem und den Wasserstoffatomen als positivem Pol. Borfluorid als eben gebautes Molekül besitzt kein molekulares Dipolmoment. Es besteht jedoch kein Zweifel, daß die einzelne B—F-Bindung polar ist, mit negativem Fluor und positivem Bor. Tritt nun Ammoniak mit Borfluorid in Wechselwirkung, so überwiegt die Anziehung der stärker geladenen Zentralatome Bor und Stickstoff, über welche die Bindung erfolgt. Fluor- und Wasserstoffatome werden abgestoßen. Sind diese Überlegungen richtig, so folgt daraus, daß nur Dipolmoleküle mit Borverbindungen reagieren können, denn nur ein Dipol ist fähig, die eben gebaute Borverbindung zu deformieren. Als Bestätigung kann eine Untersuchung von E. Wiberg und K. Karbe (20) betrachtet werden, die nachweisen konnten, daß die von H. S. Booth und K. S. Willson (21) beschriebenen Verbindungen von Borfluorid mit den dipollosen Edelgasen nicht existieren. Gemeinsam mit W. Bues (22) konnte dies auch für elementaren Stickstoff bestätigt werden. Demnach ergeben sich die Aussagen nach Kossel genauer als nach Lewis, die offensichtlich die Verhältnisse nur ganz allgemein beschreiben. Besonders zu betonen ist die Tatsache, daß sich nach Kossel genau die entgegengesetzte Ladung der B←N-Bindung ergibt als nach Lewis. Nun muß aber noch die stark polarisierende Wirkung des kleinen, dreifach geladenen Bor-Ions auf den Stickstoff berücksichtigt werden, die zu einer Schwächung der ursprünglichen Ladung führt und damit eine Annäherung an die Lewissche Anschauung zur Folge hat.

Demnach ergeben beide so extremen Betrachtungsweisen eine wesentliche Minderung der ursprünglich angenommenen Polaritäten. Der wesent-

liche und bleibende Unterschied beruht in der Annahme eines gemeinsamen Elektronenpaares nach Lewis, während nach Kossel eine elektrostatische Ionenanziehung ohne gemeinsame Elektronenhülle vorliegt. Da es sich dabei um zwei mögliche Elektronenzustände der B←N-Bindung handelt, so ist die Annahme einer Mesomerie beider Zustände naheliegend. Ein starker Anteil an polarer Bindung wird auf Grund der Eigenschaften der Verbindungen (Tab. 2) kaum bestritten werden. Aber schon die vorhandene starke Polarisation des Stickstoffatoms durch das Bor-Ion bedeutet eine Annäherung an die Lewissche Anschauung. Nun spricht aber das Aktivwerden der B←N-Bindungs-Frequenz im Raman-Effekt sehr eindeutig für einen wesentlichen Anteil an unpolarer Elektronenbindung. Auch zahlreiche Reaktionen, wie sie von E. Wiberg (4, 5, 23) u. a. (24) untersucht wurden, bestätigen immer wieder die Beständigkeit der B←N-Bindung, indem in zahlreichen Fällen die Substituenten des Bors mit denen des Stickstoffs unter Aufrechterhaltung der B←N-Bindung reagieren, wie z. B.

$$(CH_3)_3B{\leftarrow}NH_3 \longrightarrow (CH_3)_2B{=}NH_2 + CH_4.$$

Dies führt bei einzelnen Reaktionen wie $BH_3 + NH_3$ (23) oder (BF_3NH_2) Na (24) schließlich zur Bildung von Borstickstoff. Die Mesomerie erklärt auch am einfachsten die starke Minderung der Polarität der B←N-Bindung, die in einzelnen Fällen weitgehend verwirklicht ist, wie die mögliche Annäherung an die C—C-Bindung etwa in dem Paar $B(CH_3)_3 \cdot NH_3$ und $C(CH_3)_4$ zeigt.

Auch die polare Betrachtungsweise ergibt einen starken Einfluß der Substituenten. Je stärker negativ die Substituenten am Bor sind, desto positiver das Bor, desto negativer der Stickstoff, desto positiver die Wasserstoffe am Stickstoff. Sind umgekehrt stark negative Substituenten am Stickstoff, so sagt die polare Formel aus, daß keine Bindung möglich ist, da der Stickstoff dann selbst positiv wird und somit das Bor abstößt. Dieser Substituenteneinfluß äußert sich schon in der Beständigkeit der Verbindungen. Zum anderen läßt er sich sehr deutlich durch die Beeinflussung der Substituenten am Stickstoff nachweisen. Es ist bekannt, daß die Bindekräfte der H-Atome am Stickstoff wesentlich verringert werden, wenn das 4. Elektronenpaar durch Verbindungsbildung wie in den Ammoniumsalzen beansprucht wird, kenntlich an einer starken Frequenzveränderung der N—H-Valenzschwingungen. So konnte in den Verbindungen $BF_3 \cdot NH_3$ (9) und $AlCl_3 \cdot NH_3$ (18) eine besonders starke Verringerung der N—H-Bindekräfte um ungefähr 25% gegenüber Ammoniak nachgewiesen werden, wie für die stark negativen Substituenten F und Cl zu erwarten ist. Diese Lockerung der Protonen am Stickstoff bekundet sich auch in der Leitfähigkeit und in der erhöhten Reaktionsfähigkeit dieser Stoffe (15, 18). In Übereinstimmung mit diesen Erwartungen ergaben die viel schwächer negativen CH_3-Gruppen im $B(CH_3)_3 \cdot NH_3$ eine wesentlich geringere Beeinflussung der H-Atome (25). Aus dieser Tatsache könnte man geneigt sein, den Schluß zu ziehen, daß im $BF_3 \cdot NH_3$ der Stickstoff negativer ist als im Ammoniak, da die Wasserstoffatome positiver sind, und könnte damit die Entscheidung über die Polarität der B←N-Bindung zugunsten der polaren Formel fällen. Diese Schlußweise ist jedoch zu primitiv. Mit Sicherheit darf nur geschlossen werden, daß die BF_3N^{3-}-Gruppe stärker negativ ist als die $B(CH_3)_3N^{3-}$-Gruppe und diese wiederum stärker negativ als der Stickstoff im Ammoniak.

Die größte Annäherung in Tabelle 2 zeigt $B(CH_3)_3 \cdot N(CH_3)_3$ und $C(CH_3)_3C(CH_3)_3$. Neben der geringen Polarität der CH_3-Gruppe — das Dipolmoment von Trimethylamin ist wesentlich niedriger als das des Ammoniaks — dürfte dabei die Umhüllung der polaren B←N-Gruppe durch die CH_3-Gruppen eine Rolle spielen. Das Dipolmoment des Moleküls liegt abgeschirmt im Innern und kann sich bei den zwischenmolekularen Kräften kaum mehr auswirken.

Da bei den bisherigen Ausführungen mehr Wert auf die Herausarbeitung von Unterschieden zwischen isosteren Molekülpaaren gelegt wurde, so soll wenigstens kurz darauf hingewiesen werden, daß auch Ähnlichkeiten vorhanden sind. So zeigen z. B. die Raman-Spektren dieser isosteren Molekülpaare, daß sie in der Gesamtordnung der Atome innerhalb des Moleküls übereinstimmen. Weiterhin ergibt der Vergleich von Borazanderivaten mit Äthanderivaten, daß die bei letzteren beobachtete Schwächung der Bindekraft — C—C — mit zunehmender Zahl negativer Substituenten auch für Borazanderivate gilt. Trotzdem kommt man auf Grund der vorhergehenden Betrachtungen zum Schluß, daß normalerweise die Unterschiede in den Kernladungen bei isosteren Molekülpaaren zu wesentlichen Unterschieden in ihren Eigenschaften führen, so daß Ähnlichkeit isosterer Moleküle nicht von vornherein zu erwarten ist. Im Gegenteil, es muß die Frage aufgeworfen werden, welche Faktoren bei den klassischen Beispielen der Isosterie so stark diese Unterschiede verwischen.

Eine Möglichkeit, die Polarität einer Einzelbindung zu mindern, besteht in einer Ketten- bzw. Ringbildung. Es bleiben dabei allerdings die Momente der Einzelbindungen bestehen, aber in ihrer Wirkung nach außen, und zwar schon auf kurze Entfernungen, heben sie sich gegenseitig auf, so daß bei Ketten lediglich die Ladungen an den Enden wirksam sind, während bei einer Ringbildung auch diese wegfallen. So läßt sich die große Ähnlichkeit von Borazol und Benzol und ihrer Derivate (3, 4, 5) in den physikalischen Eigenschaften verstehen. Diese sind in der Hauptsache bedingt durch die zwischenmolekularen Kräfte; da diese auf größere Entfernungen hin wirksam sind, so tritt dabei der Einfluß der noch vorhandenen Momente der Einzelbindungen zurück. Beim Vergleich von Borazol- und Benzolderivaten fällt übrigens auf, daß die Schmelzpunkte und Siedepunkte der aromatischen Verbindungen meistens höher liegen, im Gegensatz zu allen anderen Beispielen. Diese stärkeren zwischenmolekularen Kräfte sind auf die 6 π-Elektronen des Benzolringes zurückzuführen, die den besonderen aromatischen Charakter bedingen. Diese fallen beim Borazol infolge der vorhandenen Polarität der B←N-Bindung weg. Dies ist auch der wesentliche Unterschied von Graphit und Borstickstoff. Auch hier bewirkt die Ringbildung weitgehende Gleichheit zahlreicher Eigenschaften; die Polarität der B←N-Einzelbindungen dagegen verhindert im Borstickstoff den aromatischen Charakter. Daß auch im Borazol die Polaritäten der Einzelbindungen noch vorhanden sind, zeigen die großen Unterschiede in den Reaktionsfähigkeiten gegenüber polaren Molekülen wie HCl, H_2O, NH_3, die an Borazol und Derivate sehr leicht angelagert werden, während Benzol völlig indifferent ist. Bei Annäherung des reagierenden Dipols an das Borazol treten starke Dipolwechselwirkungskräfte mit den einzelnen B←N-Bindungen auf, die zur Reaktion führen. Als weiteres Beispiel für die weitgehende Übereinstimmung physikalischer Eigenschaften bei Kettenbildung, in diesem Falle räumliche Vernetzung, sei SiO_2 und $AlPO_4$ erwähnt (26).

Alle die bisher besprochenen Einflüsse, wie Substituenteneinflüsse, Abschirmungseffekt und Ketten- bzw. Ringbildung, können nicht für die weitgehende Ähnlichkeit von N_2—CO. N_2O—CO_2, N_3^-—NCO^-

herangezogen werden; hier muß noch eine andersartige Beeinflussung der semipolaren Bindung vorliegen. Da es sich um ganz einfache Moleküle handelt, so kommt als nächstliegender Grund die Mehrfachbindung in Frage. In diesen Molekülen überlagert sich einer normalen homöopolaren Bindung (im CO einer Doppelbindung) eine semipolare Bindung, so daß man von „semipolaren Doppel- bzw. Dreifachbindungen" sprechen kann. Gemessene Bindekräfte und Abstände entsprechen vollständig solchen Mehrfachbindungen. Andererseits zeigen aber die geringen Dipolmomente von CO und N_2O, daß diese Bindungen nur noch ganz geringe Polarität aufweisen. Offensichtlich sind die π-Elektronen der Mehrfachbindung durch ihre größere Beweglichkeit in der Lage, die durch den Unterschied in den Kernladungen bedingte Polarität einer Bindung wesentlich vollkommener auszugleichen, als es bei *einem* bindenden Elektronenpaar möglich ist. In dieser Wirkung muß der Grund für die große Ähnlichkeit isosterer Moleküle gesehen werden, denn alle Paare größter Ähnlichkeit, auch Borazol—Benzol, enthalten Doppelbindungen.

Ist dieser Schluß richtig, so muß bei allen Verbindungen mit „semipolaren Mehrfachbindungen" eine gleiche Ähnlichkeit erwartet werden. Diese sind bei den Verbindungen des koordinativ dreiwertigen bzw. zweiwertigen Bors, vor allem also bei Borazen- bzw. Borazinderivaten zu erwarten. Durch die ausgezeichneten und ausgedehnten Experimentaluntersuchungen von E. Wiberg und Mitarbeitern (4, 5) ist eine Reihe von Borazenderivaten bekannt geworden. Aus ähnlichen Gründen wie bei Tabelle 2 sind in Tabelle 3 nur die Siedepunkte dieser Verbindungen denen der entsprechenden Äthylenderivate gegenübergestellt, soweit Vergleichsmöglichkeiten bestehen. Leider sind die Schmelzpunkte wegen Dimerisation oder glasartigen Erstarrens nicht bekannt.

Tabelle 3. *Siedepunkte von Borazen- und isosteren Äthylenderivaten.*

Borazenderivat	KP	Äthylenderivat	KP	Δ_{KP}
$B(CH_3)_2 = N(CH_3)_2$ (5)	~ 80—85°	$C(CH_3)_2 = C(CH_3)_2$	73°	+10°
$B(CH_3)_2 = N(C_2H_5)_2$ (5)	98°	$C(CH_3)_2 = C(C_2H_5)_2$	117°	—19°
$B(C_2H_5)_2 = N(CH_3)_2$ (5)	123°	$C(C_2H_5)_2 = C(CH_3)_2$	117°	+ 6°
$B(CH_3)_2 = NHCH_3$ (5)	~ 38°	$C(CH_3)_2 = CHCH_3$	39°	— 1°
$B(CH_3)_2 = NH_2$ (23)	+4°	$C(CH_3)_2 = CH_2$	—7°	+11°
$BCl_2 = N(CH_3)_2$ (27)	112°	$CCl_2 = C(CH_3)_2$	108°	+ 4°
$BBr_2 = N(CH_3)_2$ (27)	163°	$CBr_2 = C(CH_3)_2$	155°	+ 8°

Der große Unterschied gegenüber den entsprechenden Zahlen der Borazanderivate in Tabelle 2 ist auffallend. Die Ähnlichkeit ist hier nicht nur bei den stark umhüllten Molekülen (die ersten drei Beispiele) zu beobachten, sondern bei allen. Weiterhin zeigt sich, daß bei den Borazenderivaten auch der Einfluß stark negativer Substituenten weitgehend ausgeglichen wird. Diese frappierende Ähnlichkeit wiederum beweist, daß die Annahme von Doppelbindungen in den Borazenderivaten richtig ist. Durch Raman-Aufnahmen am monomeren $BCl_2{=}N(CH_3)_2$ konnte diese Annahme auch noch auf anderem Weg bestätigt werden (28). Auch das Polymerisationsvermögen all dieser Verbindungen (5) darf als Bestätigung angesehen werden. Die Ähnlichkeit in den Siedepunkten ist größer als bei den Borazolderivaten, da dort die 6 π-Elektronen des aromatischen Systems deutliche Unterschiede verursachen. Hinzuweisen ist schließlich noch auf die verhältnismäßig große Änderung, welche der Austausch von Methyl- und Äthylgruppen am Bor und Stickstoff auslöst (Beispiel 2 und 3).

Alle vorangehenden Überlegungen haben ergeben, daß isostere Verbindungen, so wie der Begriff definiert wurde, primär unähnlich sind als Folge von Unterschieden in den Kernladungen. Erst durch Wirksamkeit einer Reihe von Faktoren, von denen einzelne herausgearbeitet werden konnten, wird die Polarität so weitgehend geändert, daß tatsächlich weitgehende Übereinstimmung in physikalischen Eigenschaften beobachtet wird. Dadurch sind alle Abschattierungen möglich, von großen Unterschieden bis zu großer Ähnlichkeit. Daraus ergibt sich, daß der Begriff „isoster" entweder rein formal gefaßt werden kann wie in dieser Arbeit, wobei Moleküle verschiedenster Ähnlichkeit zusammengefaßt werden, oder aber unscharf, indem der verschwommen Begriff der „Ähnlichkeit" eingeführt wird. Diese Überlegungen lassen den Begriff der „Isosterie" selbst als fragwürdig erscheinen.

Nun zeigen gerade die vorangegangenen Betrachtungen, daß die Untersuchung „isosterer Molekülpaare" auf Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit sich als fruchtbar erweist. Sie gibt einen vertieften Einblick in die Zusammenhänge zwischen atomaren Eigenschaften und Gesamteigenschaften von Molekülen. Vor allem erlaubt dieser Vergleich, Eigenschaftsänderungen zu studieren, die durch verschiedene Polarität von Einzelbindungen verursacht sind. Diese Vergleichsmöglichkeit spricht für eine Beibehaltung des Begriffs „Isosterie", allerdings in der schärfer gefaßten Definition, die diesem Aufsatz zugrunde gelegt wurde. Andererseits muß dann auf die gedanklich mit dem Begriff der Isosterie verbundene „weitgehende Ähnlichkeit" verzichtet werden. Die gleiche Zahl von Atomen und die gleiche Zahl von Elektronen müssen sich auf gar keinen Fall in gleicher Weise anordnen. Im Gegenteil, es müssen viele Faktoren zusammenwirken, damit die Unterschiede in den Kernladungen so weit ausgeglichen werden, daß ein Molekülpaar resultiert, das weitgehende Übereinstimmung in seinen physikalischen Eigenschaften aufweist. Eine Ähnlichkeit in chemischen Eigenschaften wird jedoch bei isosteren Molekülpaaren selbst größter Ähnlichkeit nicht zu erwarten sein, da das Reaktionsvermögen wohl der empfindlichste Indikator für Unterschiede in den Bindungsverhältnissen ist. In der Reaktionsfähigkeit wirken sich deshalb die Unterschiede isosterer Molekülpaare auf alle Fälle aus.

Eingegangen am 28. September 1948.

Literatur.

(1) Ein Teil der in diesem Aufsatz entwickelten Gedankengänge wurde Oktober 1944 auf der 250. Sitzung der Göttinger Chemischen Gesellschaft vorgetragen. Vgl. Angew. Chem. A **58**, 78 (1945). — (2) Langmuir, J., Journ. Amer. Chem. Soc. **41**, 1543 (1919); **42**, 274 (1920). — (3) Wiberg, E. u. Bolz, A., Ber. dtsch. chem. Ges. **73**, 209 (1940). — (4) Wiberg, E. u. Hertwig, K., Z. anorg. Chem. **255**, 141 (1947); Wiberg, E., Bolz, A. u. Buchheit, P., Z. anorg. Chem. **256**, 285 (1948). Vgl. auch Klemm, W., Fiat-Bericht „Anorganische Chemie" Bd. I, 125 (1948). — (5) Wiberg, E., Naturwiss. **35**, 182, 212 (1948). — (6) Hückel, W., Ztschr. Elektrochem. **27**, 305 (1921). — (7) Grimm, H. G. u. Wolff, H. in Geiger, H. u. Scheel, K., Handbuch der Physik XXIV/2, 976, Verlag J. Springer, Berlin (1933). — (8) Vgl. Eucken, A., Chemie **55**, 163 (1942). — (9) Vgl. Dipl.Arbeit Link, R., Univ. Göttingen 1945, nicht veröffentlicht. — (10) Vgl. Dipl. Arbeit Günther, K.H., Univ. Göttingen 1944, nicht veröffentlicht. — (11) Vgl. Dipl.Arbeit Böhm, U., Univ. Göttingen 1944, nicht veröffentlicht und Angew. Chem. A **59**, 23 (1947). — (12) Brown, H. C., Bartholomay, H. jr. u. Taylor, M. D., Journ. Amer. Chem. Soc. **66**, 435 (1944). — (13) Burg, A. B., Schlesinger, H. J., Journ. Amer. Chem. Soc. **59**, 780 (1937). — (14) Schlesinger, H. J., Flodin, N. W. u. Burg, A. B., Journ. Amer. Chem. Soc. **61**, 1078 (1939). — (15) Klemm, W. u. Tanke, E., Z. anorg. allg. Chem. **200**, 343 (1931); Klemm, W., Clausen, E. u. Jakobi, H., Z. anorg. allg. Chem. **200**, 367 (1931). — (16) Gilliam, W. F., Liebhafsky, H. A. u. Winslow, A. F., Journ. Amer. Chem. Soc. **63**, 801 (1941). — (17) Sah, P. P. T., Journ. Amer. Chem. Soc. **50**, 517 (1928). — (18) Vgl. u. a. Goubeau, J. u. Siebert, H., Z. anorg. allg. Chem. **254**, 126 (1947). — (19) Vgl. u. a. Eistert, B., Mesomerie und Tautomerie. Verlag F. Enke, Stuttgart. — (20) Wiberg, E. u. Karbe, K., Z. anorg. Chem. **256**, 307 (1948). — (21) Booth, H. S. u. Willson, K. S., Journ. Amer. Chem. Soc. **57**, 2273 (1935). — (22) Bues, W., Dissertation, Univ. Göttingen (1948). — (23) Wiberg, E., Hertwig, K. u. Bolz, A., Z. anorg. Chem. **256**, 177 (1948). — (24) Dipl.Arbeit Schmeken, H., Univ. Göttingen (1946). — (25) Becher, J., Dipl.-Arbeit Univ. Göttingen (1947). — (26) Huttenlocher, H. F., Z. Kristallograph. A **90**, 508 (1935); Machatschki, F. u. Moser, A., Naturw. **24**, 743 (1936). — (27) Wiberg, E. u. Schuster, K., Z. anorg. allg. Chem. **213**, 77, 89 (1933). — (28) Rahtz, M., Dissertation Göttingen 1948, nicht veröffentlicht.

Berichte.

Ostafrikas Primatenfunde.

Von W. O. Dietrich.

Daß der Mensch körperlich und geistig eng mit den lebenden Großaffen zusammenhängt, dürfte keinem Zweifel mehr begegnen. Mensch, Schimpanse und Gorilla hat der Anthropologe H. Weinert als Summoprimaten — die höchsten Herrentiere — bezeichnet. Den Grad ihrer Verwandschaft entscheiden nicht die lebenden Arten, sondern die fossilen Vorfahren. Der ganze Streit um die Affenverwandschaft des Menschen erledigt sich vollends, wenn es gelingt, genügend Reste solcher Summoprimaten herbeizuschaffen.

Gegenwärtig ist L. S. B. Leakey, der Kurator des Coryndon Museum in Nairobi dabei, dem bisherigen Mangel abzuhelfen. Er hat in den letzten Jahren auf der Insel Rusinga (in der Kawirondo-Bucht an der Ostseite des Viktoriasees) in Schichten, die ungefähr 20 Millionen Jahre alt sind, sehr zahlreiche Kiefer, Gebißreste, Zähne und auch Fußknochen verschiedener Menschenaffen ausgegraben, die zusammen mit den von A. T. Hopwood bereits aus Kenya bekanntgemachten fossilen Dokumenten die Herkunft der Summoprimaten und auch anderer Linien aufzuhellen und zu entwirren erlauben. Dieser Einblick in die Werkstatt der Natur zeigt dem Paläontologen wieder einmal, wie die Natur in Spiel (Vererbung) und Sport (Anpassung) sehr lange zu probieren hat, bis der erfolgreichste Typus angelegt und zustandegebracht ist, der am Erdboden lebende, in aufrechtem Gang mehr und mehr ins anatomisch-biologische Gleichgewicht kommende Vormensch, der sodann beschleunigt zur Norm des Homo sapiens ausgestaltet wird. Die Neben- und Beiprodukte, die Seitentriebe am Hauptstamm, verkümmern, bleiben in der Entwicklung zurück, sterben ab oder halten sich infolge günstiger Umwelt bis zur Gegenwart.

Die Rusinga-Funde verkörpern, soviel läßt sich heute schon sagen, eine erstaunliche Primatenmannigfaltigkeit an der Basis des Jungtertiärs. Neben Prosimieren von noch unsicherer Stellung (*Progalago* Mac Innes) sind Cercopitheciden, *Mesopithecus? Colobus?* vorhanden. *Limnopithecus* Hopwood führt zu den Hylobatinen, *Xenopithecus* Hopw. ist ein unbestimmter Pongide (Gorilla-Linie) und der sehr gut belegte *Proconsul africanus* Hopw. gehört in die Aszendenz der Hominiden, nicht in die des Schimpansen. Seine Kiefer haben menschliche Eigenschaften und die Potenz zur Menschenmandibel und zum Menschengesicht. (Den Hirnschädel kennt man noch nicht.)

Die Rusinga-Affen zeigen weiter, daß die Vormensch-, Schimpansen-, Gibbon- und einige erloschene Linien unter Ausbreitung nach Europa, Indien und Ostasien nebeneinander ruhig sich entwickelten, bis die erschwerten Daseinsbedingungen an der Zeitwende zum Eiszeitalter vor rund einer Million Jahren überall Steigerung des Zentralorgans des Nervensystems, des Gehirns und der Sinnesorgane, auslösten. In Südafrika sehen wir die in der Fach- und Tagespresse bereits vielgenannten Australopithecinen „Affenmenschen" (*Australopithecus*, *Plesianthropus*, *Paranthropus*) hervorkommen und bald wieder vergehen, eine Seitenlinie, die sich zwischen die Schimpansen- und die Vormenschlinie einschiebt. Ihre Kapazität (gemessen am Rauminhalt der Hirnhöhle) reicht von 450 bis 650 cm³. Ungefähr gleichzeitig treten in Nordchina der Pekingmensch (*Sinanthropus*), in Mitteleuropa der Heidelbergmensch (*Palaeanthropus*) im Altquartär auf und setzen sich auf Java in *Pithecanthropus* (Mittelquartär), in Zentralafrika in *Africanthropus* (Jungquartär) fort. Ihre Kapazität beträgt 850 bis 1200 cm³. Im Mittelquartär sehen wir den Neandertaler Zweig (*Protanthropus*) mit bis 1600 cm³ wiederum absplittern.

Wenn H. Weinert von einer Pithecanthropus-Stufe, Vorneandertaler- und Sapiens-Stufe spricht, die durchlaufen werden mußten, um vom „Affenmensch" zum Mensch zu werden, so steht gegen ihn der geologische und paläontologische Befund. Für *Sinanthropus* ist das Alter durch die Begleitfauna, für *Pithecanthropus* durch die geologische Kartierung Javas, für *Africanthropus* durch die geologische Lagerung, Vorkommen und Fauna wie angegeben erwiesen. Das jungquartäre Alter von *Africanthropus* betonen neuerdings wieder Leakey und Reeve, die am Fundort Untersuchungen angestellt haben.

Die geologische Tatsache der zeitlichen Aufeinanderfolge spricht gegen die Wertung dieser Formen als Stufen oder Übergangsstadien zum Menschen selbst; es sind Nebenlinien, entstanden bei den fortwährenden Versuchen der Natur, das Äffische aus den Merkmalskombinationen der Homo-sapiens-Linie herauszubringen.

Leakey tritt auch wieder für das Bestehen der Sapienslinie seit dem Altquartär ein, da die Homo-Mandibel von Kanam (am Viktoria-See) in die altquartäre Kanam-Fauna gehöre. Er hat den Ehrgeiz, die Wiege der Menschheit in das Innere Ostafrikas zu verlegen. Die Sapiens-Schädel von Kanjera (ebenfalls am Viktoria-See) sind nach ihm gesichertes Mittelquartär (Kamasian-Pluvial). Reck's Oldoway-Mensch ist nach Leakey in das ausgehende Spätquartär (Aurignac) zu setzen. Wir haben in Europa sicherere alt-mittelquartäre Ahnen der Sapiens-Linie in den Schädelfunden von Steinheim im württembergischen Neckarland und von Swanscombe im unteren Themse-Tal und brauchen nicht zu glauben, daß der Mensch als Parvenü dastehe, wenn die Neandertaler- und die Pithecanthropus-Linien sowie die Australopithecinae als Nebenlinien, gleichsam als Versuchslinien, phylogenetisch als Ausgliederungen aus dem Hauptstamm, angesprochen werden. Der Stammbaum des Menschen ist buschig wie der anderer ausgeprägter Organismen und die Entwicklung ist nicht verschieden von der höherer Säugetiere bis zu dem Augenblick, da der Mensch als geistiges Wesen von der Natur sich emanzipierte und abstrahierte. Von da ab ist er eine Spezialschöpfung seiner selbst. Dem Paläontologen erscheint er nicht als Ziel, sondern eher als zufälliges Durchgangsstadium einer Zwangsentwicklung. Und als spezialiertes „Gehirntier" erscheint er ihm nicht weniger gefährdet als das Mammut oder die Dinosaurier einst waren: er stürzt seinem Untergang entgegen. Da jedoch der menschliche Geist weiterwirkt, auch wenn die Träger vergangen sind, kann gehäufte Erfahrung die Epigonen, wenn sie Schöpferkraft genug zeigen, vor dem Untergang bewahren.

Geologisch-paläontolog. Institut der Universität Berlin.

Eingegangen am 8. September 1948.

Dietrich, W. O., Zur Stratigraphie der Africanthropus-Fauna. Zentralbl. Miner. usw. Abt. B Stuttgart 1939.

Hennig, E., Südafrikas Primatenfunde. Die Naturwissenschaften **34**. Berlin u. Göttingen 1947.

Hopwood, A. T., Miocene Primates from Kenya. J. Linnean Soc., London 1933.

Leakey, L. S. ., Report on a visit to the site of the Eyasiskull, found by Dr. Kohl-Larsen. J. East Africa Nat. Hist. Soc. **19**. Nairobi 1946. Fossil finds in Kenya. Ape or primitive Man? „Antiquity" **20**. London 1946. Fossil and subfossil Hominoidea in East Africa. Robert Broom Commemorative Volume 1948.

Mac Innes, D. G., Notes on the East African Miocene Primates. I. East Africa Nat. Hist. Soc. **17** Nairobi 1943.

Reeve, W. H., Geological Report on the site of Dr. Kohl-Larsens discovery of a fossil human skull, Lake Eyasi, Tanganyika Territory. I. East Africa Nat. Hist. Soc. **19**, Nairobi 1946.

Weinert, H., Africanthropus njarasensis. Beschreibung und phyletische Einordnung des ersten Affenmenschen aus Ostafrika. Z. Morph. u. Anthrop. **38**. Stuttgart 1939.

Über die Farbenanpassung der Koppe (Cottus gobio L.).

Von V. Vršanský.

Im Bratislavské lekarske listy Jahrg. XXV, Nr. 1/2, 1945, veröffentlichte Dr. V. Vršanský die Ergebnisse seiner Versuche über Farbwechsel bei Koppen. Die Arbeit wurde am Zoologischen Institut der Universität München unter der Leitung von Prof. Dr. K. v. Frisch durchgeführt. Es stellte sich dabei heraus, daß

Fig. 1. Koppe auf Sandgrund.

sich diese Fische nicht nur an die Helligkeit und Farbe des Untergrundes, sondern in gewissem Grade auch an seine *Musterung* anpassen können, was bisher nur für Plattfische (durch Mast) nachgewiesen war. Es ist gewiß kein Zufall, daß die Fähigkeit, die Musterung des Untergrundes zu kopieren, sowohl im Meere wie im Süßwasser gerade bei so ausgesprochenen *Bodenfischen* zu finden ist.

Verfasser stellte fest, daß sich die Koppen der graugelben, gelben, grünen, graugrünen und grauen Farbe gut anpassen, während bei den anderen Farben — die

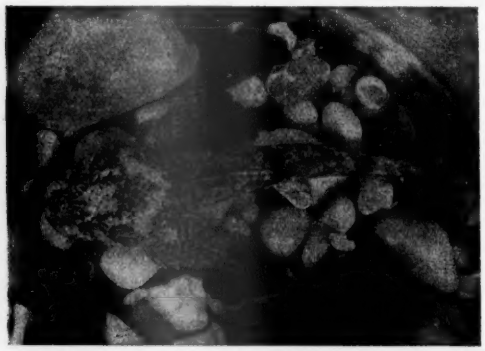


Fig. 2. Koppe auf geflecktem Grund (Kies und Kohle).

nicht in der natürlichen Umgebung der Fische vorkommen — nur die Unterschiede der Helligkeit nachgeahmt werden können.

Bei der Anpassung an die Musterung des Untergrundes entstehen die dunklen Flecken in der Haut nicht an beliebigen Stellen, sondern an bestimmten, typischen Stellen, die morphologisch durch größeren Reichtum an Pigmentzellen ausgezeichnet sind.

Bei der histologischen Untersuchung der Haut wurden bei den Koppen drei Arten von Pigmentzellen gefunden: Melanophoren, Xanthophoren und Guanophoren. Daraus erklärt sich auch die Beschränkung der Anpassung auf bestimmte Farben. Die Anzahl der Melanophoren nimmt nach der Bauchseite ab. In den dunklen Flecken sind die Melanophoren zahlreicher und überdies expandiert.

Die Anpassung ist von den Gesichtswahrnehmungen der Koppen abhängig. Blinde Fische reagieren nicht auf Veränderungen des Untergrundes und sind stets dunkel. Befindet sich der Kopf über einer schwarzen Stelle und der Körper über einer hellen, so färbt sich der Fisch dunkel, und umgekehrt. Wenn ein Auge über einer schwarzen und das andere über einer hellen Stelle liegt, nimmt das Tier eine mittlere Helligkeit an.

Die Koppen kopieren die Größe der Flecken des Untergrundes, aber nicht ihre Form. Auf großgeflecktem Grund treten grobe Flecken in der Haut auf, und auf kleingemustertem Grund werden auch die Hautflecken klein (Fig. 1—4).

Die Regulierung des Farbwechsels geht wie bei anderen Fischen vor sich. Ein Aufhellungszentrum liegt im verlängerten Mark (vgl. v. Frisch). Von dort verlaufen die pigmentomotorischen Bahnen durch das Rückenmark bis zum 9. Wirbel und treten dort in den Sympathicus über. Gegenüber der Ellritze ist also die Übertrittsstelle cranial verschoben.

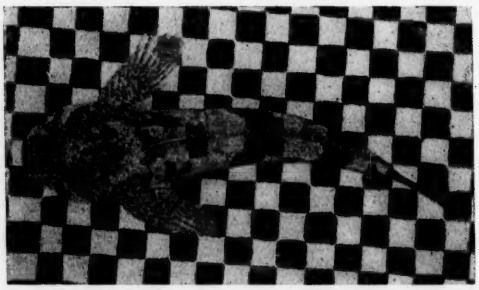


Fig. 3. Koppe auf grobem Schachbrettmuster (5 mm Seitenlänge).

Durch Versuche mit Untergrundwahl ließ sich zeigen, daß die Koppen Rot, Gelb, Grün und Blau unterscheiden können. Sie bevorzugen jene Farbe, auf der sie längere Zeit gefüttert wurden. Sie wählen die betreffende Farbe auch richtig zwischen verschiedenen Grauabstufungen, haben also Farbensinn. Am liebsten verweilen sie auf einem Untergrund, der den Farben ihres natürlichen Milieus entspricht, nämlich: graugelb, graugrün, grün, grau und Kombinationen dieser Farben. Wenn sie z. B. längere Zeit

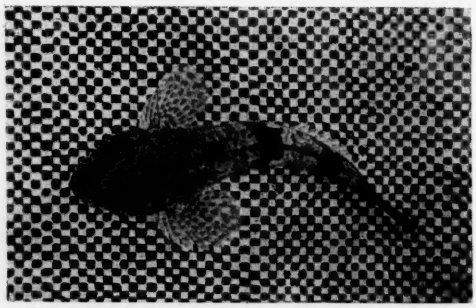


Fig. 4. Koppe auf feinem Schachbrettmuster (2 mm Seitenlänge).

auf roter Farbe gehalten werden und dann in ein Aquarium mit verschiedenfarbigem Untergrund versetzt werden (z. B. rot, grün, gelb und blau), so begeben sie sich zunächst auf den roten Untergrund. Nach kurzer Zeit gehen sie aber spontan auf die grüne Farbe über und bleiben dort.

Eingegangen am 10. September 1948.

Kurze Originalmitteilungen.

Über das Temperaturfeld im freibrennenden Niederstromkohlebogen.

Der radiale Temperaturverlauf einer in Luft freibrennenden, senkrechten Bogensäule ist von H. Hörmann[1]) aus der spezifischen Strahlungsintensität der Borlinien 2497/2498 A ermittelt worden. R. Mannkopff[2]) hat mit einem aus der Wärmeleitungsgleichung hergeleiteten Iterationsverfahren den Temperaturverlauf quer zur Achse berechnet und für den inneren Teil der stromleitenden Zone gute Übereinstimmung mit den Hörmannschen Messungen gefunden. In diesen Arbeiten wird jedoch nur der Temperaturverlauf zwischen der Säulenachse r = o (7000° K) und dem Radius r = 0,17 cm (4000° K) erfaßt, während die Temperatur der äußeren Bogenbezirke bisher nicht gemessen werden konnte. Dieser Bereich ist aber zur Vervollständigung der Bogentheorie bedeutungsvoll, und so wurde hier die Temperaturmessung mit Hilfe der Toeplerschen Schlierenmethode durchgeführt.

Die Temperatur eines Gases bestimmt bekanntlich durch die Dichte den Brechungsindex. Liegt, wie im Bogenplasma, eine radiale Temperaturverteilung vor, so wird auch der Brechungsindex vom Radius abhängen. Dementsprechend werden Lichtstrahlen, die von außen her den Bogen passieren, Ablenkungen erfahren, die ihrerseits Rückschlüsse auf die Temperaturverteilung ermöglichen. Zur Messung der Ablenkungen ist das Toeplersche Schlierenverfahren besonders geeignet. Da man einen senkrechtbrennenden Bogen als rotationssymmetrisch ansehen kann, läßt sich aus der Größe der Ablenkung als Funktion des Achsenabstandes der Gradient des Brechungsindex $\frac{\partial n}{\partial r}$ errechnen. Durch Integration des Gradienten über r findet man für den Radius r den Brechungsindex. Dieser steht mit der Dichte in der Beziehung: $\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{\varrho}{\varrho_0}$ (Index o gilt für Außentemperatur T_0). Da für einen isobaren Vorgang, der beim freibrennenden Bogen vorliegt, Temperatur und Dichte umgekehrt proportional sind, ergibt sich zwischen Brechungsindex und Temperatur die Beziehung $\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{T_0}{T}$. Der Gültigkeitsbereich dieser Formel wird jedoch für hohe Temperaturen durch den Einfluß innermolekularer Vorgänge auf den Brechungsindex eingeschränkt. Eine grobe Abschätzung zeigt, daß dieser Einfluß bis $T \approx 2500°$ K vernachlässigt werden darf. Hier setzt auch bereits Dissoziation ein, die die Zusammensetzung des Gasgemisches verändert. Eine Berechnung von T aus dem Brechungsindex ist dann nicht mehr ohne weiteres möglich.

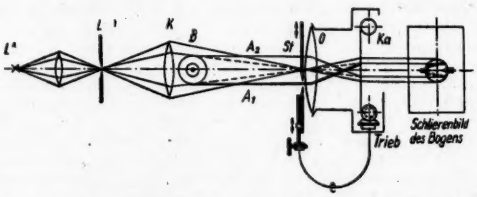


Fig. 1. Schlierenanordnung zur Aufnahme der Kurven gleicher Ablenkung. Der beleuchtete Spalt L wird vom Schlierenkopf K in der Ebene des fahrbaren Spaltes S_f abgebildet. Das Objektiv O entwirft vom vertikal brennenden Bogen B ein Bild auf den Film der Kamera Ka. In diesem Bild erscheint nur die Zone hell, die die von L kommenden Strahlen gerade in den Spalt S_f hinein ablenken (A_1).

Zur Messung der Ablenkung wurde die in Fig. 1 wiedergegebene Anordnung benutzt. Sie stellt eine Abänderung des Gitterblendenverfahrens dar, das wegen der geringen Ablenkungen (maximal 5 mm auf 5 m) in seiner ursprünglichen Form nicht mehr anwendbar war. Die Gitterblende wurde daher durch einen verschiebbaren Spalt ersetzt, den ein Filmapparat nach jedem Bild horizontal um ein definiertes Wegelement transportierte. So wurde das normale Gitterschlierenbild in einer Reihe von etwa 20 Filmbildern bei einer Aufnahmedauer von etwa 1 Sekunde aufgelöst. In jedem dieser Bilder erschienen dann diejenigen Zonen des Bogens hell, die das durchfallende Licht um den gleichen Betrag ablenkten. Die Größe der Ablenkung war durch die jeweilige Stellung des Spaltes bestimmt. Um Streuungen herauszumitteln, die durch kleine Bogenschwankungen bedingt waren, wurde jede Aufnahmeserie unter gleichen Versuchsbedingungen fünfmal wiederholt. Mit einem Komparator ausgemessen, lieferten die Bilder eine Kurve, in der die Ablenkung der Lichtstrahlen in Abhängigkeit vom Achsenabstand dargestellt war. Aus dieser Funktion konnte nach dem oben skizzierten Rechenverfahren der radiale Temperaturverlauf ermittelt werden.

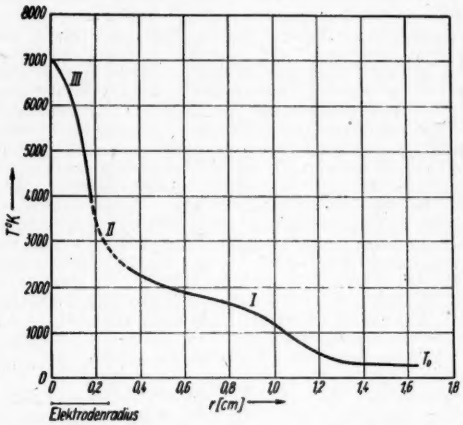


Fig. 2. Radialer Temperaturverlauf für den Mittelquerschnitt eines 10 Amp.-Bogens. I. Gemessen mit dem Schlierenverfahren. II. Interpoliert. III. Gemessen aus dem Intensitätsabfall der Borlinien nach H. Hörmann.

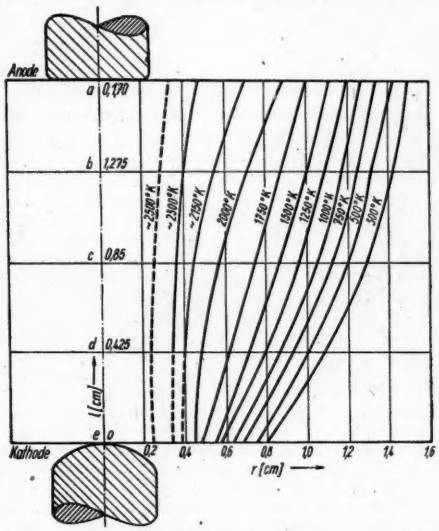


Fig. 3. Isothermen für die äußeren Bereiche des 10-Amp.-Bogens, ermittelt durch Auswertung einer Schlierenaufnahmeserie in den Querschnitten a—e.

Im Anschluß an Hörmann wurde nach diesem Verfahren der Temperaturverlauf eines 10-Amperebogens in 5 Querschnitten von verschiedener Höhe gemessen. Fig. 2, Kurve I, gibt für diesen den Mittelquerschnitt wieder. Kurve III ist den Hörmannschen Messungen entnommen, wobei die Achsentemperatur mit 7000° K angesetzt wurde. Der Kurventeil II ist durch Interpolation gewonnen.

Fig. 3 zeigt die Isothermen für die äußeren Bereiche des 10-Amperebogens, wie sie sich aus den Temperaturkurven für verschiedene Höhen ergeben. Die Anwendung des Verfahrens auf drei weitere Bögen mit den Stromstärken 5 Amp., 15 Amp. und 20 Amp. ergibt, daß die Isothermen mit zunehmender Stromstärke etwa parallel nach außen verschoben werden.

Nach der Elenbaas-Hellerschen Differentialgleichung wird die dem Bogen pro cm Länge zugeführte elektrische Leistung wieder als Wärme und Strahlung abgeführt. Nimmt man als Ableitmechanismus nur Wärmeleitung an — der Energietransport durch Strahlung ist vernachlässigbar klein —, so müßte die Energie, die irgendeinem Zylinder um die Bogenachse vom Radius r und der Höhe 1 cm in der Zeiteinheit elektrisch zugeführt wird, durch den Zylindermantel wieder abströmen. Wie die Mannkopffsche Rechnung zeigt, ist diese Annahme etwa bis zu einem Radius $r = 0{,}15$ cm gerechtfertigt. Berechnet man aber nach der Wärmeleitungsgleichung die Energie, die durch den Zylinder mit $r = 1{,}4$ cm hindurchtritt, mit dem Temperaturgradienten aus Fig. 1, so ergibt sich, daß hier außen nur noch ein kleiner Bruchteil der elektrischen Energie durch Wärmeleitung transportiert wird. Daraus kann man folgern, daß für $r > 0{,}15$ cm der größte Teil der Wärme durch Konvektion abströmt, wovon man sich auch durch Beobachtung der aufsteigenden Flammen überzeugen kann.

Institut für Experimentalphysik der Universität Kiel.

H. Maecker und J. Sperling.

Eingegangen am 11. September 1948.

[1]) Hörmann, H., ZS. f. Phys., **97**, 539 (1935).
[2]) Mannkopff, R., ZS. f. Phys., **120**, 228 (1943).

Zur systematischen Bestimmung der Phasen von Röntgenstreuwellen bei der Kristallstrukturanalyse.

Das Röntgenstrahlenexperiment kann bekanntlich nur die Absolutwerte, jedoch nicht die zu einer vollständigen Strukturkenntnis notwendigen Phasen der Streuwellen vermitteln. In speziellen Fällen gelingt es, durch Untersuchung isomorpher Kristalle Anhaltspunkte zu gewinnen. In neuerer Zeit werden experimentelle Lösungen dieser Frage durch Benutzung des kontinuierlichen Untergrundes diskutiert (Temperaturgitter)[1]), um mindestens zu einer Teilkenntnis dieser wichtigen Daten zu gelangen. Doch im allgemeinen wird heute noch nach der Methode der sogenannten successiven Näherung gearbeitet, indem mit mehr oder minder großem Geschick und Intuition ein Modell vorgeschlagen wird, das bei Übereinstimmung seiner berechneten Intensitätswerte mit den experimentell gefundenen als richtig anerkannt wird. Durch eine nachfolgende Darstellung des Ergebnisses als Fouriersynthese kann eine weitere Verschärfung der Parameterwerte erhalten werden.

Es ist nun möglich, die Fouriersynthese bei Vorliegen zentrosymetrischer Kristalle nicht nur als Rechenmethode, sondern auch als Hilfsmittel zu einer systematischen Methode der Strukturbestimmung zu verwenden. Überlegt man nämlich, daß jede Fourierdarstellung einer z. B. zweidimensionalen Vielfalt als Näherungsdarstellung aufzufassen ist, die erst bei unendlicher Gliederzahl die fehlerfreie Kurve ergibt, so wird klar, daß bei richtiger Führung der Summation ein jedes Bild mit n Gliedern eine Näherung des folgenden Bildes mit n+1 Gliedern ist. Da die Vorzeichenumkehr (Verschiebung des Gliedes um eine halbe Wellenlänge) ein ziemlich bedeutender Eingriff ist, wird es in sehr vielen Fällen gelingen, zwischen den fraglichen beiden „Zwischenbildern", die ja auch eine Näherung des letzten Bildes sind, zu entscheiden und so nach und nach zu der richtigen Vorzeichenkombination zu gelangen. Als Kriterium für die Bildbeurteilung stehen allgemeine Daten, wie maximale und minimale Elektronendichte, maximale Zahl der Streuzentren (Atome) zur Verfügung, es können jedoch auch spezielle Annahmen über die Struktur verwendet und so manches mögliche Modell bereits frühzeitig ausgeschaltet werden. Insbesondere bei organischen Molekülen ist die Molekülstruktur in den meisten Fällen als ungefähr bekannt anzusehen. Für die Ordnung der einzelnen Glieder zur nacheinander erfolgenden Summation kann man nach zwei Gesichtspunkten vorgehen:

1. Ordnung nach abnehmendem Netzebenenabstand,
2. Ordnung nach abnehmender Amplitude.

Im ersten Fall wird die Bildgenauigkeit (Ortsgenauigkeit) nach $d/2$ zunehmen, im zweiten Fall haben wir den Vorteil besonders starker Bildänderungen zu Beginn der Synthese, die wegen der noch geringeren Differenziertheit besonders schwer zu beurteilen ist.

Der exakteste, allerdings auch langwierigste Weg ist folgender:

a) Man multipliziert ein jedes Glied mit der Funktion $\exp. -\frac{2\pi \sin \vartheta}{\lambda} A$ (Rechentemperatur). Dadurch tritt eine Schwächung ein, die zu dem Verschwinden vieler Glieder führt. Bei geeigneter Wahl der Konstante A kann erreicht werden, daß nur wenige, stärkste Glieder erhalten bleiben, für die durch Vorzeichenpermutation die richtigen Vorzeichen gefunden werden.

b) Durch Wahl einer kleineren Konstante A erhält eine neue Gruppe von Gliedern merkliche Amplituden, die nun wieder neu erprobt werden. Es müssen allerdings auch für die alten Glieder Korrekturen hinzugefügt werden, deren Vorzeichen jedoch bekannt sind.

c) Dieses Vorgehen kann beliebig oft wiederholt werden.

Der Vorteil dieser Methode ist die Ausschaltung von Störungen, die durch Abbruchseffekte entstehen können. Jeder „Berg" hat hier eine sicherlich reale Bedeutung. Es ist, als ob wir ein Bild mit einer zunächst unscharf eingestellten Optik betrachten würden und langsam immer schärfer stellen. Die ersten beiden Methoden arbeiten dagegen immer mit den gleichen „Scharfstellungen", jedoch verschiedenen (zu kleinen) Aperturen der Optik, die bekanntlich Beugungssäume am Bild verursachen und so zu einer größeren Kritik bei der Beurteilung zwingen.

Die rechnerische Durchführung in bekannter Weise auch mit Rechenhilfen, wie Rechentafeln und Nomogrammen ist praktisch unmöglich, wenn man bedenkt, welche Mühe nur zur Berechnung einer einzigen Konturenkarte verwendet werden muß. Auch die bisher vorgeschlagenen maschinellen Rechnungsmethoden für ein- und zweidimensionale Synthesen (z. B. nach dem Hollerithsystem) sind ungeeignet, da bei ihnen die Zwischenschritte der Synthese nicht sofort greifbar sind. Dagegen ist ein neuartiger, direkter Fouriersynthetisator des Verfassers für zweidimensionale Reihen zur Zeit im Bau[2]), der speziell für diese Methode geeignet ist. Das Hinzufügen und Wegnehmen eines neuen Gliedes benötigt nur wenige Sekunden und jedes Zwischenresultat ist mit der vollen Genauigkeit des Endresultates als „Nadelgebirge", gebildet aus 516 Nadeln in einem Intervall von 270 × 270 mm, anschaulich zu überblicken, so daß Veränderungen der Maxima und Minima sofort zu erkennen sind. Also auch die Resultatabnahme, die allein bei jeder bisher bekannten Konstruktion durch die Eintragung der Funktionswerte und die Konstruktion der Höhenkarte beträchtliche Zeit erfordert, kann hier für die Zwischenschritte erspart werden.

Eine teilweise Kenntnis von Phasenwinkeln (etwa nach einer der eingangs gekennzeichneten Methoden gewonnen) erhöht natürlich die Schnelligkeit der Rechnung.

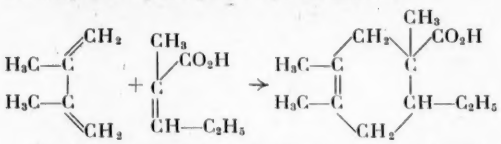
Walter Hoppe, München-Solln.

Eingegangen am 23. September 1948.

[1]) Nature, **158**, 380 (1946).
[2]) Bezugsquelle: Fa. Pan G.m.b.H. München, Bothmerstr. 14.

Die Synthese der 1, 3, 4-Trimethyl-6-äthyl-Δ^3-tetrahydrobenzoesäure.

In der III. Mitteilung[1]) unserer Versuche zur Synthese von Steroiden wurde u. a. die Darstellung des 1, 3, 4-Trimethyl-6-äthyl-Δ^3-tetrahydrobenzaldehyds (Semicarbazon Schmp. 155—156°) beschrieben und kurz angedeutet, daß der Aldehyd mit Silberoxyd nach M. Delépine zur 1, 3, 4-Trimethyl-6-äthyl-Δ^3-tetrahydrobenzoesäure oxydiert werden soll. Dabei wurde auch auf die Möglichkeit hingewiesen, diese Säure durch Diensynthese von 2,3-Dimethylbutadien mit α-Methyl-β-äthyl-acrylsäure[2]) zu erhalten:



Wir haben inzwischen die Umsetzung durchgeführt und die 1, 3, 4-Trimethyl-6-äthyl-Δ^3-tetrahydrobenzoesäure mit dem Schmelzpunkt 121—122° gewonnen. Die Säure kann aus Petroläther umkristallisiert werden und löst sich in kalter Natriumcarbonat-Lösung. $C_{12}H_{20}O_2$ (196,3): Ber. C 73,42 H 10,27 Gef. C 73,40 H 10,13.

Die α-Methyl-β-äthyl-acrylsäure wird damit zum ersten Male als philodiene Komponente für Synthesen nach Diels-Alder benützt. Im Hinblick auf Untersuchungen von K. Miescher und Mitarbeitern[3]) über oestrogene Carbonsäuren hat die Verwendung der α-Methyl-β-äthyl-acrylsäure als Partner für Diensynthesen besondere Bedeutung und wir beabsichtigen deshalb, die am Beispiel des 2,3-Dimethyl-butadiens studierte Möglichkeit auf das 6-Methoxy-1-vinyl-3,4-dihydronaphthalin zu übertragen und so zu Phenanthrenderivaten zu kommen.

Erlangen, Chemisches Laboratorium der Universität.

Emil Buchta.

Eingegangen am 13. September 1948.

[1]) Buchta, E., Chem. Ber. **81**, 254 (1948).
[2]) Goldberg, A. A. u. Linstead, R. P., Journ. chem. Soc. London 2355 (1928).
[3]) Miescher, K. u. Mitarbeiter, Helv. chim. Acta **27**, 1727 (1944) und spätere Mitteilungen.

Mißbildungen an Tritonkeimen durch experimentellen Sauerstoffmangel nach abgeschlossener Gastrulation.

Zwei vorausgegangene Versuchsreihen (Büchner, Maurath und Rehn, Rübsaamen) hatten an Tritonkeimen schwere Mißbildungen am Zentralnervensystem bis zur Cyklopie, Acephalie und Anencephalie ergeben, wenn die Keime vor beendeter Gastrulation in einem starken Sauerstoffmangel im Unterdruck oder im Sauerstoff-armen Stickstoff-Sauerstoffgemisch zur Entwicklung gebracht wurden. In der Deutung dieser Befunde war die Frage aufgetaucht, in welchem Umfang den beobachteten Mißbildungen lediglich eine Störung der Organisatorwirkung oder zusätzlich eine solche des reagierenden Keimteils zugrunde liegt.

In unseren neuen Versuchen wurden Tritonkeime nach beendeter Gastrulation (Harrison-Stadien 13—16) für einige Tage in ein Sauerstoff-armes Stickstoff-Sauerstoffgemisch (2,1% O_2) gebracht, anschließend weitere Tage in Normalatmosphäre belassen und dann, sofern der Versuch überlebt wurde, fixiert. Schon die Neurulation zeigte bei den meisten Keimen einen sehr atypischen Verlauf. Die Neuralwülste erhoben sich nur verzögert, häufig waren sie asymmetrisch. Sie schlossen sich im Verhältnis zur Entwicklung des Gesamtkeims nur sehr verspätet oder überhaupt nicht. Besondere Schwierigkeiten zeigten sich am cranialen und caudalen Pol. So wurde vereinzelt noch im Stadium 34 im caudalen Rumpfdrittel die Neuralanlage als flache Rinne nicht geschlossen gefunden.

Die meisten Keime mit derart groben Veränderungen starben in den Stadien bis 34 ab. Bei den Keimen, die länger lebten, war die Pigmentierung der Augen stark verzögert. Weiter ergaben sich häufig an den Kiemen Abweichungen. Entweder waren die Kiemenstämmchen verwachsen oder es waren nur 2 oder auch 4 Kiemenstämmchen beidseits zu erkennen. Bei einseitiger Verkümmerung war in vielen Fällen die gleichseitige Extremität kleiner entwickelt. Bei zahlreichen Keimen waren die Augen unterschiedlich groß. In solchen Fällen wurden regelmäßig einseitig oder beidseits keine oder zu kleine Linsen gefunden.

Die histologische Serienuntersuchung bestätigte diese Befunde. Bei den im Lupenbild zu kleinen Linsen stellten wir fest, daß diese als kegelförmige, oft mächtige Gebilde aus der Tiefe der Retina entsprangen und nur ein kleines Bläschen durch den Irisspalt ausstülpten. So entstand beim lebenden Keim der Eindruck der zu kleinen Linse. War eine Linsenbildung ausgeblieben, so fanden sich Störungen am Aufbau des Augenbechers. Meist war der Irisspalt zu klein und seine Ränder waren durch lockeres Mesenchym verwachsen. Auch stärkere Verwerfungen der Augenbecher wurden beobachtet. Vereinzelt fand sich eine cystische Erweiterung der Nasen und der Ohrbläschen.

In einigen Fällen war das Rückenmark verändert. Es handelte sich dabei um Bilder, die als Myelocelen zu charakterisieren sind: eine zipfelige Ausziehung des Rückenmarks zieht dorsal nach der einen Seite durch ein Muskelsegment hindurch und gewinnt Anschluß an eine hier dicht unter dem Ektoderm liegende Gruppe von Neuralzellen. Der Zentralkanal zieht dabei mit dieser Ausziehung bis unter das Ektoderm. In zwei Fällen steigerte sich dieses Bild bis zur Diplomyelie. Bei weiteren Keimen war eine Verwerfung der Struktur des Rückenmarks oder eine hydropische Erweiterung seines Zentralkanals zu erkennen. Bemerkenswert erscheint, daß alle Keime mit derartigen Störungen am Rückenmark auch Veränderungen an den Augen zeigten, sei es, daß die Linsen fehlten oder daß sie aus Retinamaterial gebildet waren.

Das Gehirn einzelner Keime zeigte eine Verwerfung der Strukturen oder eine Hydrocephalie.

An den mesodermalen Organen standen Störungen der Chorda und der Vornieren im Vordergrund. An der Chorda fand sich noch im Stadium 43 reichlich Dotter, also deutliche Dotterpersistenz mit einer Hemmung der Ausdifferenzierung, Verwerfung und vereinzelt Verdoppelung. Die Vornieren zeigten eine unterschiedlich starke ein- oder beidseitige Erweiterung ihrer Kanälchen. Diese Störungen der mesodermalen Strukturen waren so gut wie nie mit solchen der direkt übergeordneten Anlage des Zentralnervensystems vergesellschaftet.

Aus unseren Beobachtungen schließen wir, daß der Sauerstoffmangel direkt an den präsumptiven Organanlagen während der Ausdifferenzierung angreifen kann und daß er auch dann für die Genese der Mißbildungen eine bedeutende Rolle spielt, wenn die Gastrulation zur Zeit seines Wirksamwerdens bereits abgelaufen ist und Aktions- und Reaktionssystem sich zeitlich und örtlich normal vereinigt haben.

Aus dem Pathologischen Institut,
dem Ludwig Aschoff-Haus,
der Universität Freiburg/Breisgau
(Dir. Prof. Dr. F. Büchner). H. Rübsaamen.

Eingegangen am 13. September 1948.

Über die Magnesiumaktivierung der sauren Muskelphosphatase.

Cl. Knoevenagel[1]) zeigte in unserem Institut, daß die Muskelphosphatase als eine Phosphatase mit saurem p_H-Optimum ausnahmsweise durch Mg aktiviert wird, wenn man Glycerophosphat als Substrat verwendet. Die Prostataphosphatase wird dagegen auch nach langdauernder Dialyse oder Elektrodialyse durch Mg nicht aktiviert. Dies ist das allgemeine Verhalten der sauren Phosphatase; es wird allgemein angenommen, daß die Aktivierbarkeit des Mg eine charakteristische Eigenschaft der Phosphatasen mit alkalischem und neutralem p_H-Optimum ist.

In neuerer Zeit vertritt P. Ohlmeyer[2]) die Ansicht, daß alle Phosphatasen im Verhalten gegenüber Mg grundsätzlich übereinstimmen Die Phosphatasen sollen Metallproteide sein, die sich durch das Dissoziationsvermögen des Metalles voneinander unterscheiden. Bei den Phosphatasen mit saurem p_H-Optimum soll das Mg besonders fest gebunden sein, sie sind daher schwer als Metallproteide zu erkennen. Diese Ansicht wird gestützt durch den Nachweis, daß die Fluoridhemmung der Prostataphosphatase durch Mg erheblich verstärkt wird, daß die saure Muskelphosphatase nach Dialyse durch Mg erheblich stärker aktiviert wird sowie durch einige andere Befunde. Die Fluoridhemmung soll auf der reversiblen Bildung einer wirkungslosen Verbindung Phosphatase — Mg — F_2 beruhen.

In einer Untersuchung mit H. Wüst[3]) zeigten wir, daß die Fluoridhemmung der sauren Phosphatase von der Affinität des verwendeten Substrates zum Ferment abhängt. Die Affinität des Phenylphosphates zum Ferment ist groß und daher die Hemmung gering, während es beim β-Glyzerophosphat umgekehrt ist. Fluoratom und Substrat werden u. a. an der gleichen Stelle des Enzymmoleküls gebunden, welches ein Metallatom sein kann. Es wird vermutet, daß dieses Metallatom nur die Bindung des Substrates an das Enzymmolekül bewerkstelligt, während die Hydrolyse durch irgendeine andere Gruppe durchgeführt wird.

Tabelle 1.

	Glyzerophosphat m/200 Mg		Phenylphosphat m/200 Mg	
Muskel-Extrakt . . .	1,66	1,66	5,00	5,00
4 Tage Dialyse . . .	1,28	2,66	4,14	4,10
9 Tage Dialyse . . .	0,76	2,88	3,90	3,90
20 Tage Dialyse . . .	0,45	2,53	3,33	3,40

In einer neuen Untersuchung beschäftigten wir uns mit der eigenartigen Aktivierbarkeit der sauren Muskelphosphatase, wobei wir, wie im Falle der Fluoridhemmung, 2 verschiedene Substrate verwendeten. Wir finden, daß diese Mg-Aktivierung einen komplexen Vorgang darstellt.

Aus der vorstehenden Tabelle ergibt es sich, daß die Fermentaktivität durch die Dialyse stark abnimmt. Zusatz von Mg bewirkt eine starke Aktivierung, wenn man *Glyzerophosphat* als Substrat verwendet. Es ist aber auffallend, daß der unbehandelte Muskelextrakt durch Mg entweder gar nicht oder nur ganz schwach aktiviert wird, während schon nach kurzer Dialyse die Aktivierung zu Spaltungswerten führt, die bedeutend höher liegen als im ursprünglichen Muskelextrakt. Wenn die geringere Aktivität bei allen Fermentansätzen einheitlich durch zu wenig Mg erklärt werden soll, dann ist nicht einzusehen, warum im ursprünglichen Muskelextrakt durch Zusatz von Mg nicht diejenigen Spaltungswerte erreicht werden können, die man schon nach 4 Tagen Dialyse (in anderen Versuchen schon nach 1 ½ Tagen) durch Mg-Zusatz erhält, es sei denn, man nimmt an, es dialysiere ein Stoff weg, der die Mg-Aktivierung behindert. Aber ganz auffallend ist die Erscheinung, daß auch bei Verwendung von *Phenylphosphat* als Substrat durch Dialyse eine starke Aktivitätsabnahme erfolgt, während die Aktivierung durch Mg in allen Versuchen völlig ausbleibt. Diese Befunde lassen sich nur erklären, wenn man annimmt, daß der herausdialysierende Stoff kein Mg ist.

In einer 2. Versuchsreihe untersuchten wir die Abhängigkeit der Mg-Aktivierung von der Substratkonzentration, wobei wir uns auf die Verwendung von Glyzerophosphat beschränkten.

Tabelle 2.

I. Muskelextrakt nach 4 Tagen Dialyse.

Substratkonzentration		m/200 Mg	% Aktivierung
0,026 mol.	0,67	0,74	+ 10%
0,078 mol.	1,11	1,55	+ 40%
0,130 mol.	1,86	3,33	+ 80%
0,260 mol.	2,07	4,78	+ 131%
II. Derselbe Extrakt nach 10 Tagen Dialyse.			
0,026 mol.	0,33	0,37	+ 12%
0,078 mol.	0,46	0,93	+ 102%
0,130 mol.	0,64	2,16	+ 238%
0,260 mol.	0,70	3,14	+ 349%

Die obige Versuchsreihe zeigt, daß die Mg-Aktivierbarkeit des Fermentes mit der Substratkonzentration stark zunimmt, und zwar in der Weise, daß sie bei kleinen Substratkonzentrationen praktisch unmerklich ist (eine Aktivierung von + 10% bleibt noch innerhalb der Fehlergrenzen unserer Methode), während bei steigender Substratkonzentration sehr hohe Aktivierungen erreicht werden. Besonders wichtig ist aber die Tatsache, daß in dieser Versuchsanordnung deutlich wird, daß auch für das Substrat Glyzerophosphat die Abnahme der Fermentaktivität bei der Dialyse nicht auf einer Entfernung von Mg beruhen kann. Wäre z. B. die Abnahme der Fermentaktivität bei der Substratkonzentration 0,026 mol. von 0,67 mgP auf 0,33 mgP auf eine Abnahme des Mg zurückzuführen, so müßte auf Zusatz von Mg der ursprüngliche Spaltungswert erreicht werden. Dies ist aber nicht der Fall, denn die Mg-Aktivierung bleibt in länger dauerndem Dialyseversuch genau so unbedeutend wie bei kürzerer Dialyse. Auch bei den höheren Substratkonzentrationen ist diese Erscheinung deutlich, denn alle Mg-Zusatzwerte der zehntägigen Dialyse sind — absolut genommen — bedeutend niedriger als die Mg-Werte nach viertägiger Dialyse, trotzdem der Grad der Aktivierung bedeutend größer ist. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden daher am besten gedeutet durch die Annahme, daß die Ursache der Aktivitätsabnahme bei der Dialyse nicht auf einer Entfernung von Mg beruht, sondern daß ein anderer noch unbekannter Stoff herausdialysiert.

In weiteren Versuchen haben wir die Dialysierflüssigkeit im Vakuum bis auf das ursprüngliche Volumen eingedampft und den dialysierten Fermentextrakten zugesetzt: Die Phenylphosphatspaltung wurde fast bis zur ursprünglichen Höhe gesteigert, ohne daß in der zugesetzten Flüssigkeit Mg nachzuweisen war. Damit ist der Beweis erbracht, daß die saure Muskelphosphatase durch einen noch unbekannten dialysierenden Stoff aktiviert wird. Unsere Versuche werden fortgesetzt.

Aus der Chemischen Abteilung des Physiologischen Instituts der Universität Heidelberg.

Waldemar Kutscher und Kurt Schreier.

Eingegangen am 24. Juli 1948.

[1]) Cl. Knoevenagel, Biochem. Z. **305**, 337 (1940).
[2]) P. Ohlmeyer, Z. f. Naturforschung **1**, 18, (1946).
[3]) W. K. und H. Wüst, Biochem. Z. **310**, 292)1942).

Besprechungen.

Triebel, E., **Methodische und technische Fragen der Mikropaläontologie.** — Senckenberg-Buch 19, 47 S., 35 Abb. W. Kramer, Frankfurt a. M. 1947.

Ob man die Mikropaläontologie als eigene „Wissenschaft" bezeichnet (wie es manche Mikropaläontologen tun) oder sie nur mehr als „Handwerk" betrachtet (wie es andere wollen) — auf alle Fälle spielt sie in der modernen angewandten Geologie, vor allem im Erdölbergbau, die allergrößte Rolle. Neue Erfahrungen werden ständig gewonnen. Darüber berichtet E. Triebel, der Abteilungsleiter für Mikropaläontologie am Natur-Museum Senckenberg, in zwangloser Form, und alle, die sich etwa mit Aufbereitung von Foraminiferen-führenden Gesteinen, mit Auslesen und Photographieren von Mikrofossilien usw. zu beschäftigen haben, werden seine Anregungen dankbar begrüßen.

Die Ausstattung des Buches ist für die augenblicklichen deutschen Verhältnisse sehr gut. Man fragt sich aber fast, ob es nötig war, für die Mitteilung einzelner, zwar sehr wertvoller, doch systematisch nicht vollständiger Erfahrungen diese Form der Veröffentlichung zu wählen, und ob es nicht lohnender gewesen wäre, dafür gleich eine vollständige Einführung in die Methoden der Mikropaläontologie zu geben.

M. Schwarzbach.

Eingegangen am 23. Oktober 1948.

Veröffentlicht unter Zulassungs-Nr. 48 der Britischen Militärregierung. - Herausgeber und verantwortlicher Redakteur: Professor Dr. Arnold Eucken, Göttingen, Bürgerstraße 50. - Für den Anzeigenteil verantwortlich: Hans-Georg Halfter, Stahnsdorf b. Berlin, Meisenweg 33. - Druck: A. Bagel, Düsseldorf. - Springer-Verlag, Berlin und Göttingen. - Printed in Germany.